

# Umweltauswirkungen und Rohstoffaspekte von Elektroautos

Energietreff SG - Elektromobilität und Schnittstellen zum Gebäude  
20.02.2019 @ Einstein Congress SG

## 1. **Umweltauswirkungen der Mobilität**

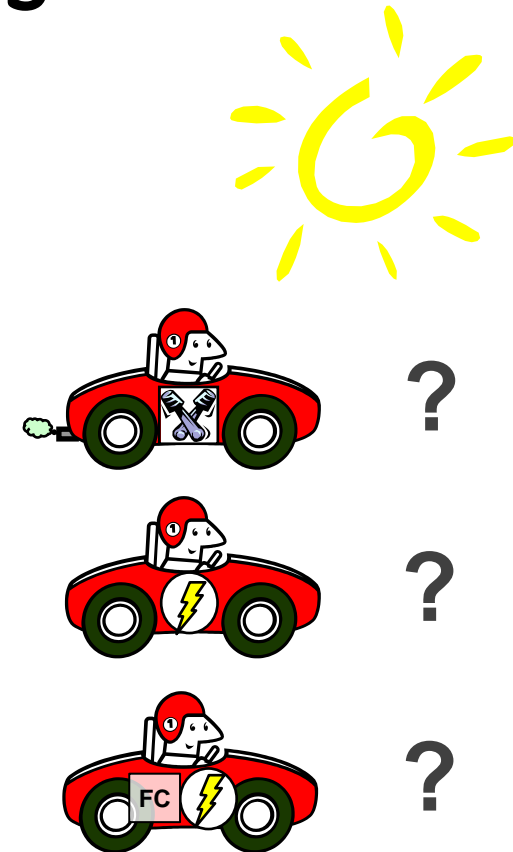
TA-Swiss Studie

## 2. **Optionen für Energie und Mobilität**

Welche Energieform und Antriebsart 'gewinnt'?

## 3. **Rohstoffe, Ressourcen**

Batterien (Li, Co, Recycling...)



**Marcel Gauch** marcel.gauch@empa.ch

TSL Technology and Society Lab @ EMPA

CARE Critical Materials and Resource Efficiency

Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt

Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

# Elektromobilität und Batterien sind schlimm!

- Allgemeine Presse: Enorme Bandbreite an 'Fakten'
- Lithium geht aus, Cobalt ist giftig, es gibt kein Recycling, ...

Weltwoche 17.08.2017

Datum: 17.08.2017

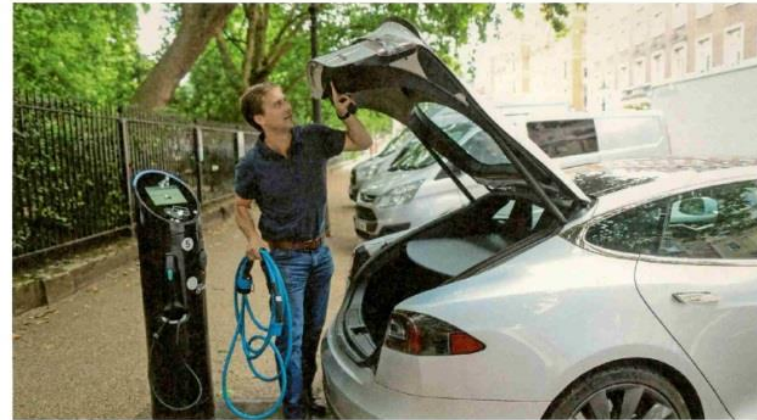
**DIE WELTWOCH**

Technology

Die Weltwoche 8022 Zürich 042 444 87 00 www.weltwoche.ch  
 Medienart: Print  
 Medientyp: Tages- und Wochenpresse  
 Auflage: 61'900  
 Erscheinungsweise: 50x jährlich  
 Seite: 32  
 Fläche: 123 710 mm<sup>2</sup>  
 Auftrag: 1098747  
 Themen-Nr.: 999 055  
 Referenz: 66332667  
 Ausschnitt Seite: 1/4

## Energieverschwendung der Extraklasse

Die Elektromobilität ist alles andere als umweltfreundlich, dies belegte die Weltwoche in der letzten Ausgabe. Besonders schlecht schneiden E-Autos beim Ressourcenverbrauch ab: Wer mit Strom fährt, benötigt mehr als doppelt so viel Energie, als wenn er mit Benzin unterwegs wäre. Von Ferruccio Ferroni\* und Alex Reichmuth



Leere Behauptungen: Tesla Model S beim Aufladen.

- Lithium ist hochgiftig und radioaktiv
- ein eAuto braucht 60 kWh/100km

Tagesanzeiger 12.09.2017

### Hintergrund & Debatte

## Der Totgesagte

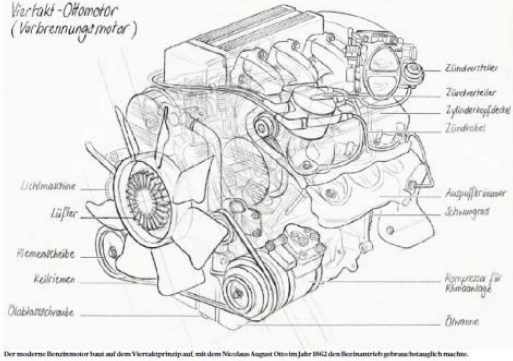
Die Nachricht vom nahen Ende des Verbrennungsmotors kommt verfrüht. Benzin- und Dieselaautos werden noch lange auf den Strassen der Welt fahren.

Eiger Schuler (Text) und Sando Wismann (Illustration)

Die Aussagen des Wissenschaftlers, bis so oder wie dramatisch, das effizienteste Weichensteuerverfahren, der Verbrennungsmotor stürze 100 Jahre nach seiner Erfindung kurz vor seinem 100-jährigen Jubiläum ins Schweine. Die Automobilindustrie will sich in zwei Jahren keine Sorgen mehr machen, die nur mit Autos oder Taxis betrieben werden. Indien, Norwegen, Frankreich und England haben angekündigt, dass sie Autos mit Verbrennungsmotoren drastisch einschränken oder verbieten wollen. In der Schweiz fordern die Grünen, die Neuzulassung von Benzin- und Dieselfahrzeugen ab 2025 zu untersagen. Eine Zulassung mit neuer Elektroantriebsart ist aber schon seit Jahren im Gespräch. Die Schweizer Automobilindustrie ist sich bewusst, dass die elektrische Revolution nur noch ein paar Jahre entfernt ist. Zurzeit hat sich der Ölkonsum zum 10. Mal seit seinem Höchststand für die Verbrennung des Elektromotors massiv nach oben bewegt. Er rechnet mit einer Steigerung von heute 2 Millionen bis 2017. Die grüne Einschränkung laut BP: Die Nachfrage nach Autos – vor allem in den Schwellenländern – wird das elektrische Angebot um ein Vielfaches übersteigen.

BP-Chefkolonne Dale Spencer rechnete der britischen Zeitung „Financial Times“, von dem in den nächsten Jahren 2 Milliarden Menschen für einen Auto kaufen werden, die meisten Benzinmotoren. Nicht Elektromotoren wie Tesla und Merks wie Europa spielen laut Spencer Hauptrollen, sondern Menschen in Asien und ihre Hochtechnologie.

Massentaugliche Elektroautos  
 Die Prognosen von BP sind möglicherweise übertrieben und die Fertigungskapazität für die nächsten Jahre ist ebenfalls kritischer als die prognostizierte Nachfrage für den Elektroantrieb. Diese wird jedoch durch handliche technische Fortschritte bei Batterien und Elektromotoren. Das



Der moderne Benzinmotor baut auf dem Viertaktprinzip auf, mit dem Nicolaus August Otto im Jahr 1862 den Benzinmotor erfand. Er ist heute noch im Einsatz.

- Die Nachricht vom nahen Ende des Verbrennungsmotors kommt verfrüht.
- Benzin- und Dieselaautos werden noch lange auf den Strassen der Welt fahren.

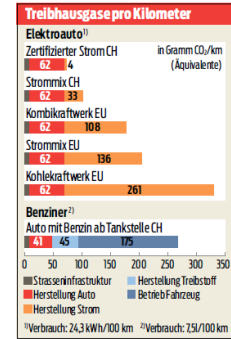
Blick 29.08.2017

## E-Autos sauberer als Verbrenner

# Schluss mit den Elektro-Vorurteilen

Die Energiebilanz von Elektroautos sorgt regelmässig für rote Köpfe. Der Vorwurf der E-Auto-Gegner: Die Akkuproduktion belastet die Umwelt so stark, dass Autos mit sparsamem Verbrenner ihren Elektropendants in der Ökobilanz überlegen seien. In der Tat entstehen bei Strom heute 90 Prozent der Treibhausgase bei der Herstellung – beim Bau konventioneller Benzin wird die Umwelt zwar auch belastet, allerdings um rund ein Drittel weniger (Daten gemäss TA-Swiss-Studie).

Allein die Herstellung des Akkus macht etwa 20 Prozent der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Stromers aus. Diese vorerst schlechtere Bilanz gleichen die E-Autos im Betrieb aber aus. Selbst wenn die Fahrzeuge den



durchschnittlichen EU-Strommix tanken, stösst es gar 60 Prozent weniger CO<sub>2</sub> aus und ist somit von der Herstellung bis zur Entsorgung immer sauberer als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge. Nur bei ausschliesslich mit Kohlestrom betriebenen E-Autos wäre die CO<sub>2</sub>-Bilanz schlechter.

- Datenquelle: TA-Swiss Studie

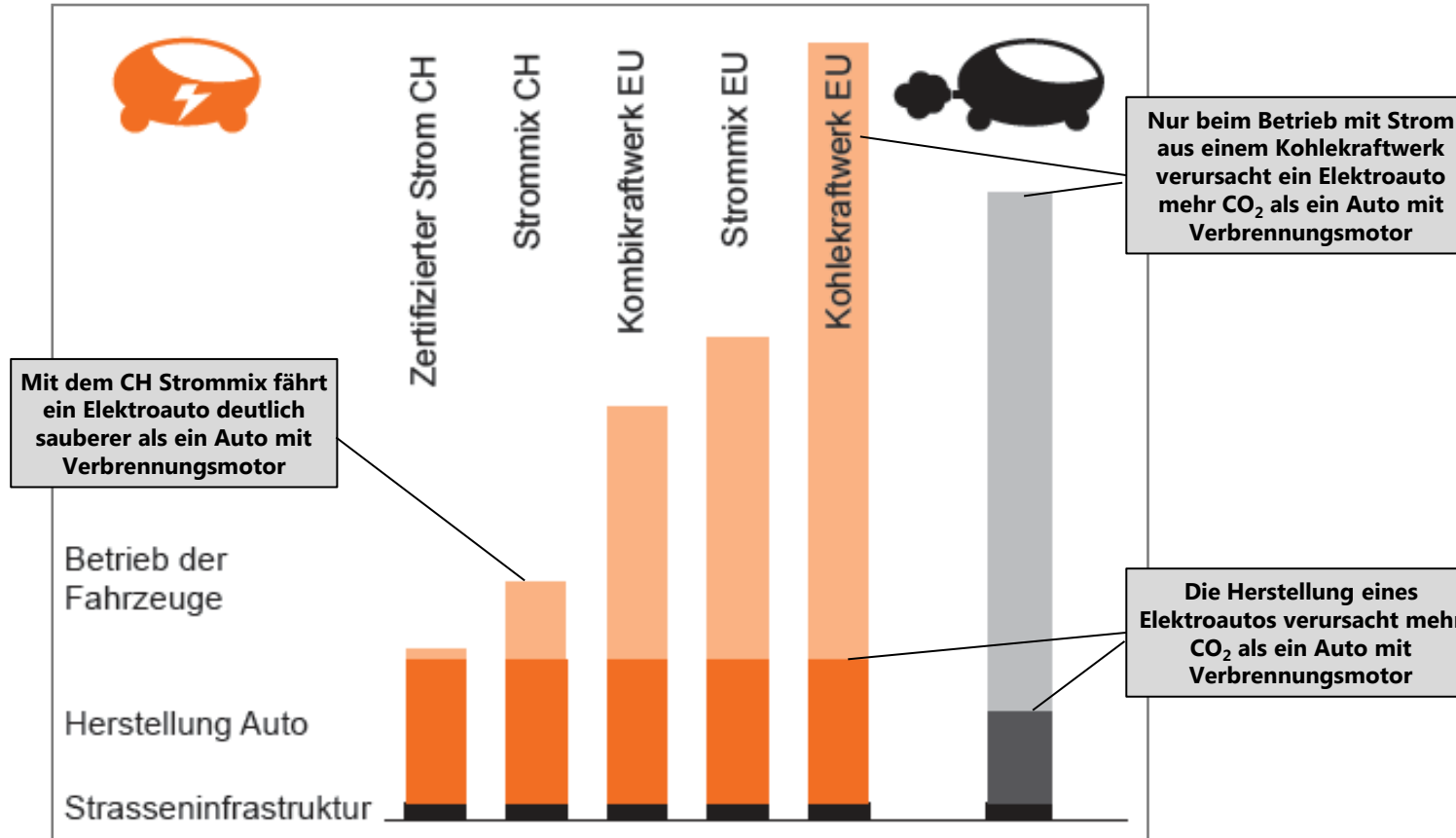
## Die Batterie – das Herzstück

Die meisten E-Autos speichern ihren Strom in Lithium-Ionen-Akkus. Sie wurden erst im Jahr 2011 eingeführt, weshalb die Lebensdauer nur geschätzt werden kann: auf zehn bis zwölf Jahre. Danach werden die Batterien aber nicht einfach entsorgt, sondern können als Zwischenspeicher weiterverwendet und schliesslich fast vollumfänglich rezykliert werden. Die Umweltbelastung dürfte auch sinken, weil die Akkukapazität bis 2035 bei gleicher Grösse verdreifacht wird – die Kosten aber auf fast ein Viertel des heutigen Preises sinken.

neller PW. Wird das Auto mit dem Schweizer Strommix betrieben, stösst es gar 60 Prozent weniger CO<sub>2</sub> aus und ist somit von der Herstellung bis zur Entsorgung immer sauberer als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge. Nur bei ausschliesslich mit Kohlestrom betriebenen E-Autos wäre die CO<sub>2</sub>-Bilanz schlechter. Andreas Engel

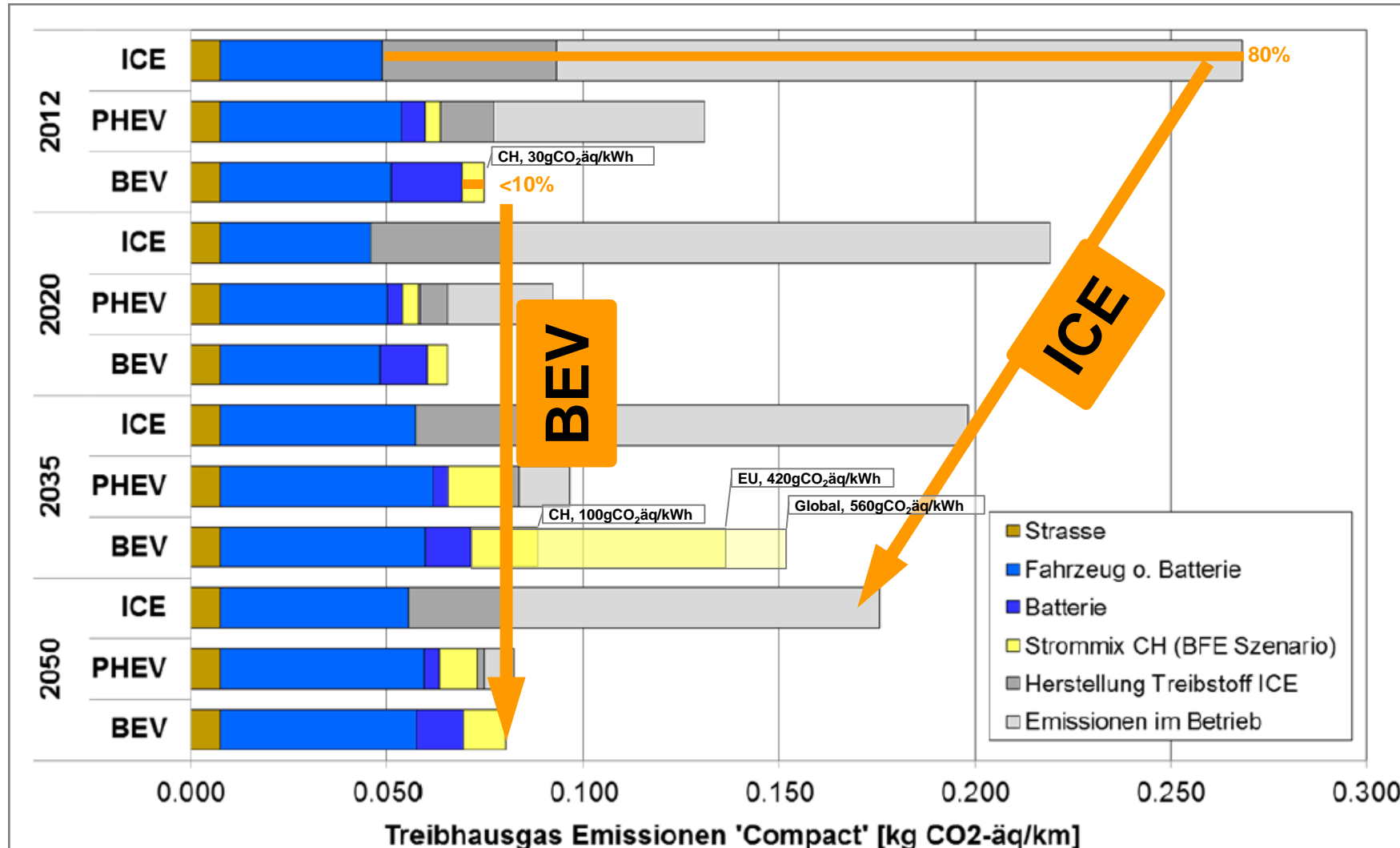
# TA-SWISS - Treibhausgas-Emissionen

## ■ Vergleich verschiedener Antriebsarten



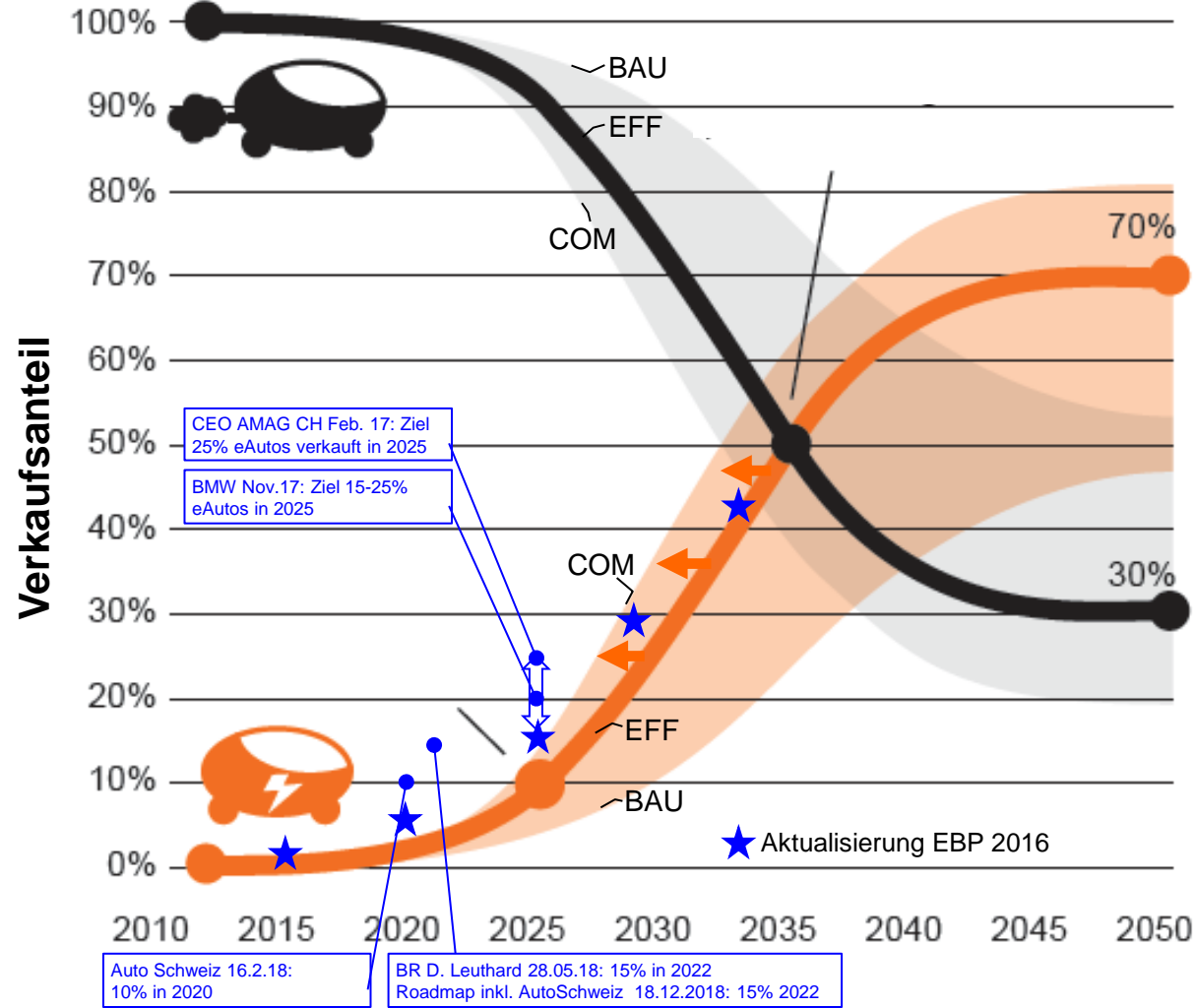
# TA-SWISS - Treibhausgas-Emissionen

- 'Golfklasse', Entwicklung über die Zeit



# Entwicklung der Verkaufsanteile

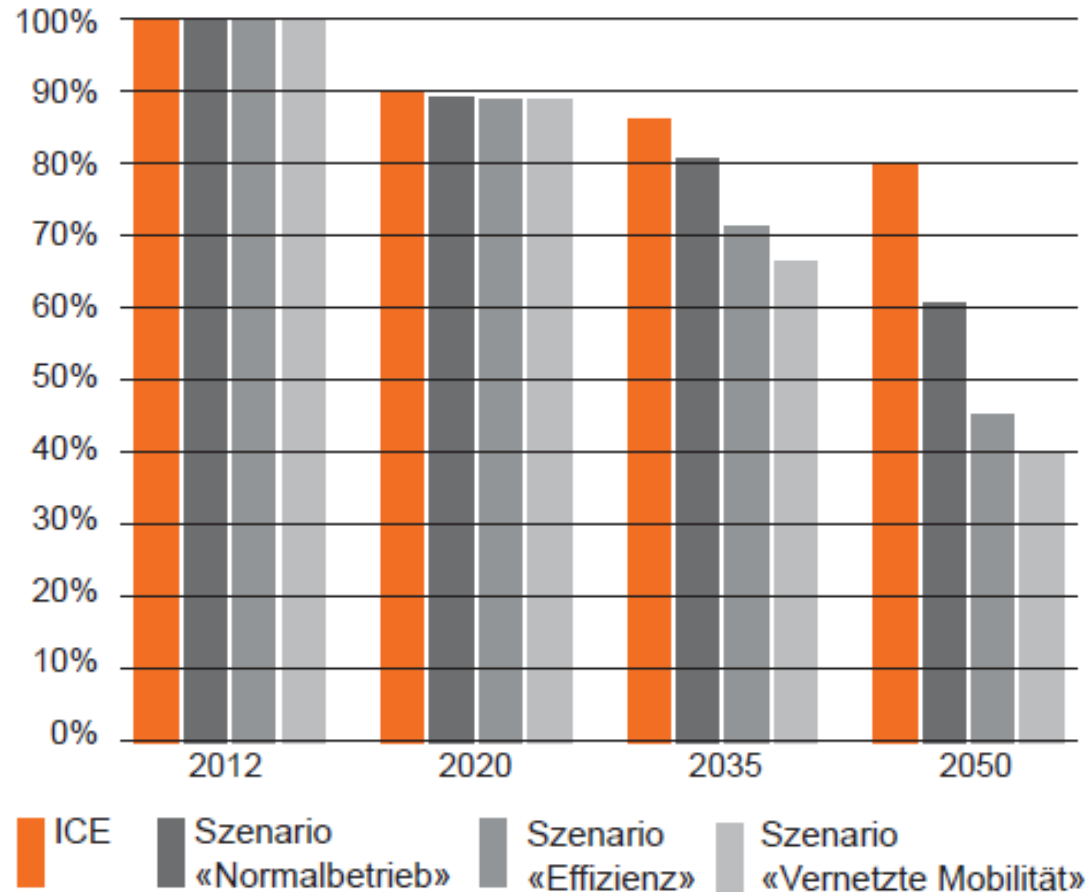
- Anteile konventionell/elektrisch in drei Szenarien BAU, EFF, COM



# Emissionen der CH-Fahrzeugflotte

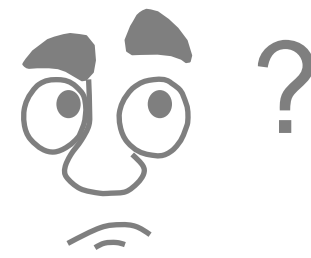
- Wie entwickeln sich die Treibhausgas-Emissionen?

CO<sub>2</sub>-Emissionen (Flotte), Vergleich mit 2012



## Erkenntnisse

- Es geschieht nicht über Nacht...
- Bereits der normale technische Fortschritt führt zu einem Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- Ein zunehmender Anteil an Elektrofahrzeugen führt zu deutlichen Reduktionen des Ausstosses von Treibhausgas.
- **Das ist jedoch nicht genug, um die <2°C -Ziele gemäss Kyoto/Paris zu erfüllen.**  
(-50% CO<sub>2</sub> bis 2030, null CO<sub>2</sub> bis 2050)



## Widersprüchliche Aussagen führen zu Verwirrung...

- Widersprüche kommen (leider) auch aus der Forschung. Es gibt KEINE gemeinsame Meinung, insbesondere über **realistische Zeithorizonte** für mögliche Veränderungen.
- Je nach Perspektive resultieren verschiedene Ansichten. Wer hat Recht? Wem soll man glauben?
- Diese Präsentation zeigt Ergebnisse aus einer langfristig orientierten Nachhaltigkeitsperspektive des Technology & Society Lab der Empa.



# Optionen für Energie



Die Sonne, what else?...

## Energiereserven

Photosynthese,  
>100 Mio. Jahre



Kohle, Erdöl, Erdgas

Photosynthese  
Fläche und Zeit



Ersatzstoff für fossile  
Energieträger

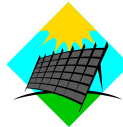
## Fossile und biogene Treibstoffe



**gewohnte Systeme  
einfach speicherbar**

## Energieflüsse

Sonnenlicht  
(Photonen)



Strom

## Strom aus diversen Quellen

Verdunstung,  
Niederschlag



Strom

Temperatur  
Druckdifferenz



Strom



**Synthetische Kohlenwasserstoffe**  
"Power-to-Gas"  
"Syn/Sunfuel"  
"Erneuerbarer Diesel"  
 $\eta \sim 40..60\%_{\max}$  bis  $\text{CH}_4$  <sup>1)</sup>  $\eta \sim 20..40\%_{\max}$  Roundtrip-Effizienz

**Herausforderung:  
Abstimmen von  
Angebot/Nachfrage**

**Herausforderung:  
Stromspeicherung**

$\eta \sim 70..90\%$  Roundtrip-Effizienz je nach Technologie  
(Druckluft, Pumpspeicher-Kraftwerk, Batterie)

## Egal welcher Pfad, die grossen Fragen...

- ... Verfügbarkeit im eigenen Einflussbereich?
- ... Flächenbedarf (Energie vs. Nahrung)?
- ... Konsequenz für zukünftige Generationen und Umwelt?
- ... Infrastrukturaufwand und Kosten?

1) Transport & Environment; Published: October 2018; CNG and LNG for vehicles and ships - the facts; European Federation for Transport and Environment AISBL



# Optionen für Mobilität

## Energie 'am Rad'

### ■ Grundprinzip (unabhängig von Antriebsart/Motor):

### Effizienz

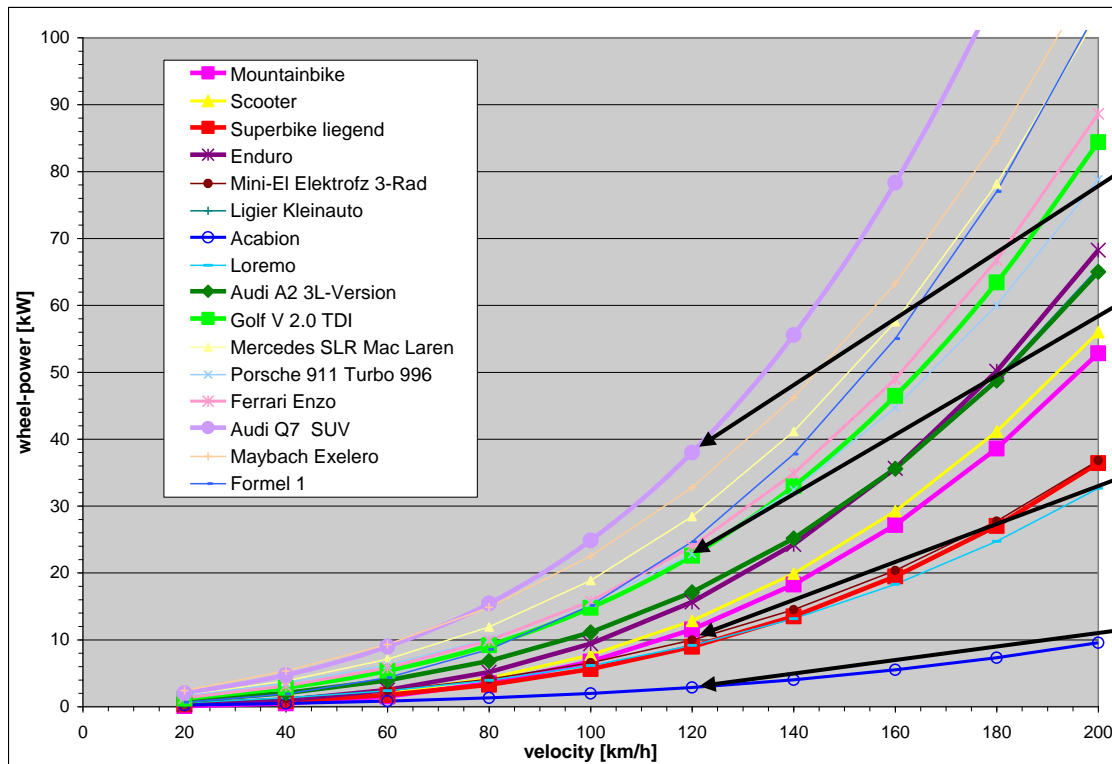
Der Energiebedarf eines Fahrzeugs ist von nur 4 Faktoren abhängig:

1. Masse
2. Frontfläche
3. Luftwiderstand
4. Rollwiderstand

kg ↓  
m<sup>2</sup> ↓  
C<sub>w</sub> ↓  
μ ↓



Isaac Newton's laws of motion and gravity 1687



graphics: Empa



38kW@120km/h  
**52PS** an den Rädern



23kW@120km/h  
**31PS** an den Rädern

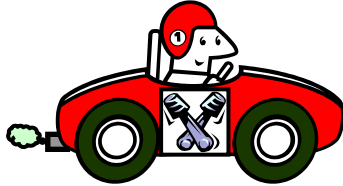


12kW@120km/h  
**16PS** an den Rädern



3kW@120km/h  
**4PS** an den Rädern

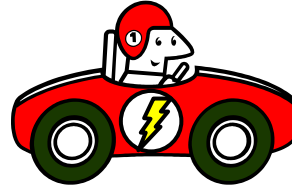
### Fossile und biogene Treibstoffe



#### Verbrennungsmotor (ICE)

- Fossile Treibstoffe:
  - Erdgas
  - Benzin
  - Diesel
- Biogas (Methan) aus:
  - Bioabfall (CH)
- Bioethanol (Alkohol) aus:
  - Zuckerrohr (BR)
  - Holzabfälle (CH)
- Biodiesel (Methylester) aus:
  - Palmöl (MY)

### Strom aus diversen Quellen



#### Elektroantrieb mit Batterie (BEV)

- Ökostrom CH (15 g/kWh (Dose))
- Nuklear CH (28 g/kWh (Dose))
- PV-Dach CH (82 g/kWh)
- Steckdosen-Mix CH (99 g/kWh)
- Strom aus modernem Gas-Kombikraftwerk (444 g/kWh)
- Steckdosen-Mix EU (ENTSO, 479 g/kWh)
- Kohlekraftwerk DE (1081 g/kWh)

### Mischformen, Hybridantriebe



#### Hybrid (HEV) 'Prius'

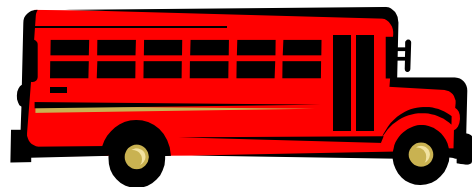
- Benzin
- Erdgas (Empa CLEVER)

#### Plug-In Hybrid (PHEV) 'Ampera'

- Steckdosen-Mix CH (99 g/kWh)
- Benzin

#### Brennstoffzelle (FC)

- Wasserstoff H<sub>2</sub>



- Umstieg auf andere Verkehrsmittel, z.B. **öffentlicher Verkehr** oder **Zweiräder**

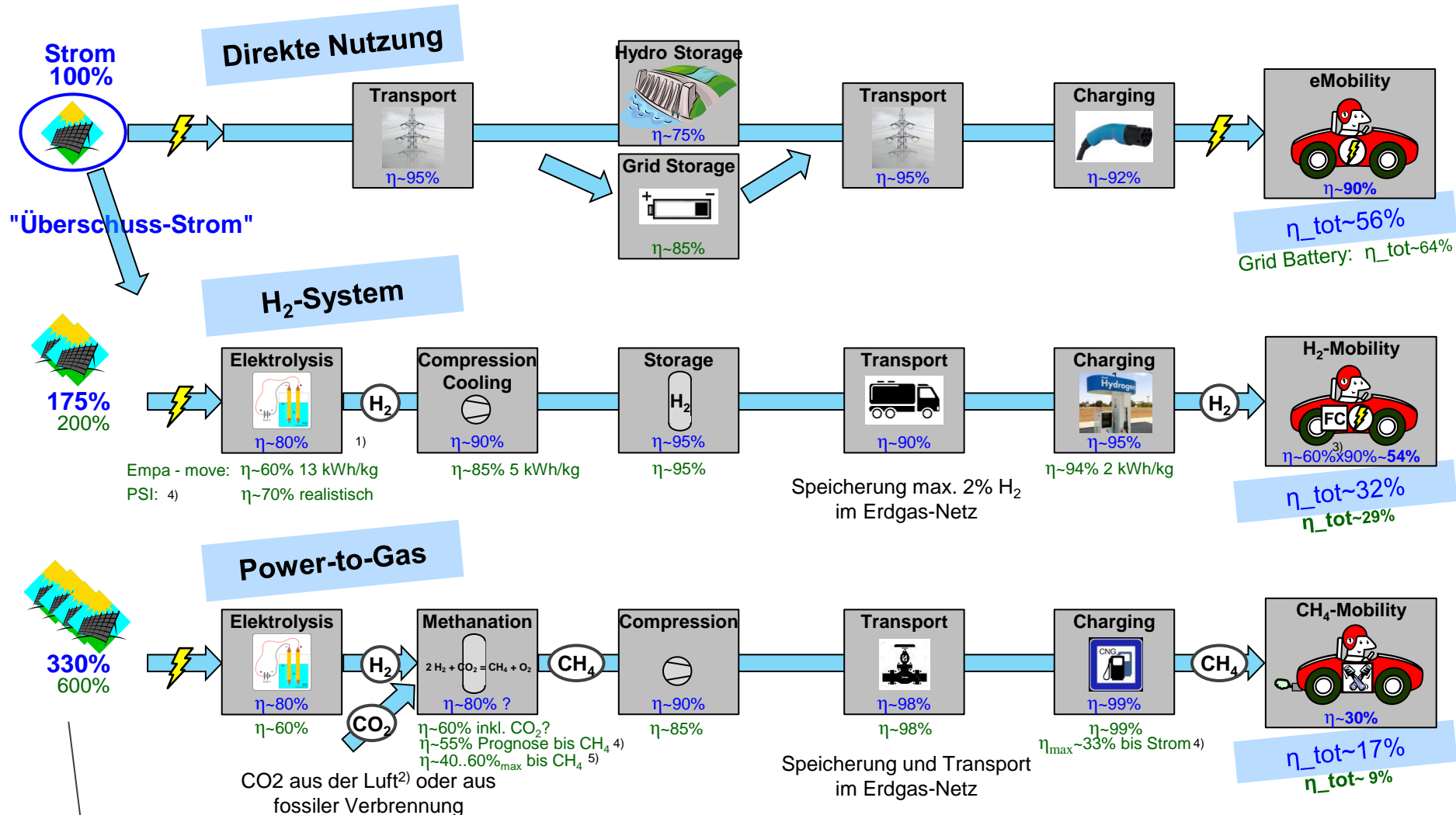
### Egal welcher Pfad, die grossen Fragen...

- ... schmal, leicht, windschlüpfrig, ...
- ... erneuerbare Energieträger
- ... verträgliche Materialien (elements of hope)
- ... hohe Recyclingtauglichkeit

# Optionen für Mobilität

... erneuerbar plus effiziente Energiebereitstellung

■ Welcher Anteil der erneuerbaren Energie kann in Bewegung umgewandelt werden?



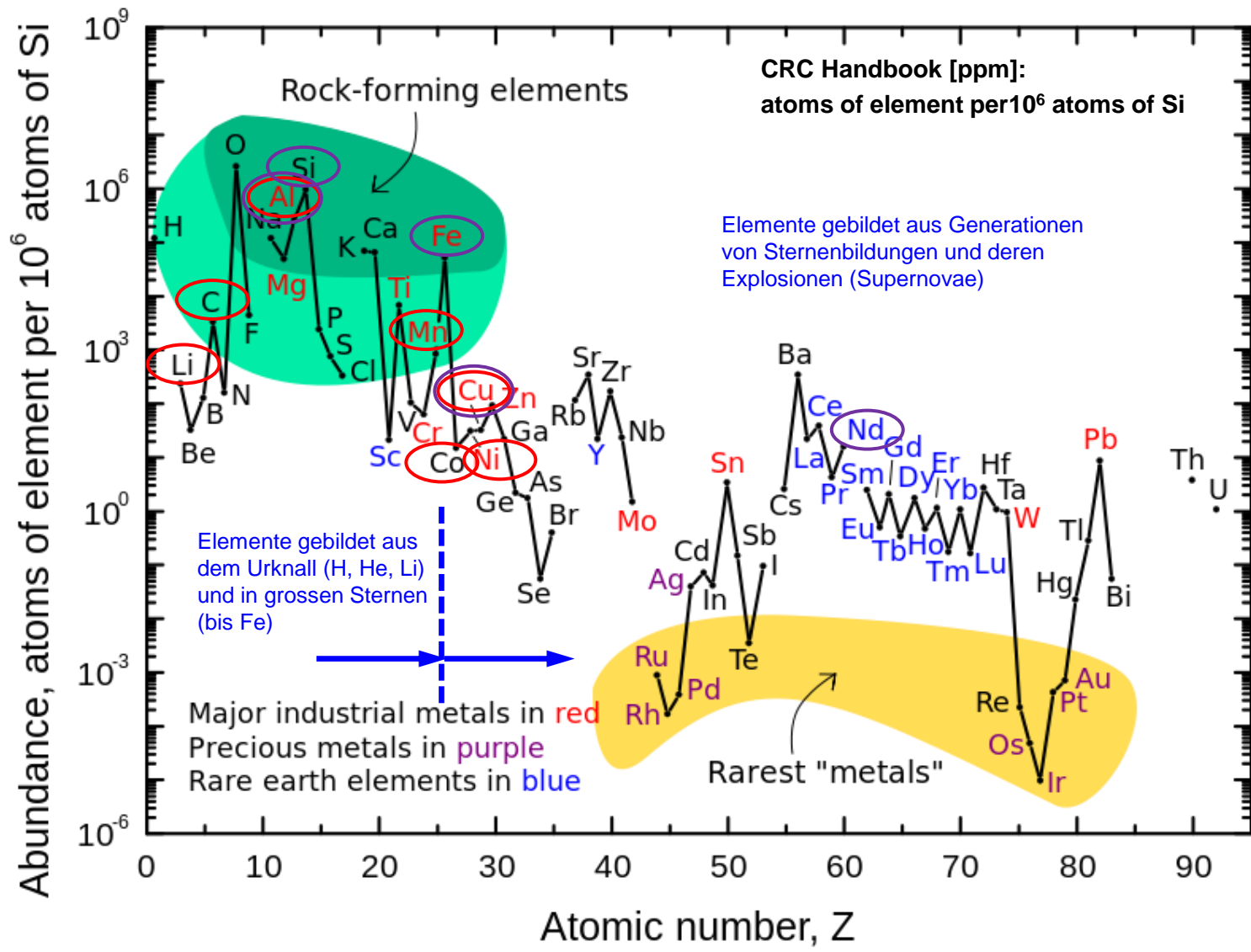
**Mehrfacher Strom- und Infrastrukturbedarf im Vergleich mit direkter Nutzung für den identischen Mobilitätsbedarf**

1) Umweltbundesamt 2015; Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050; ISSN 1862-4804  
 2) Für 1 t CO<sub>2</sub> (aus 1.4 Mio. m<sup>3</sup> Luft) braucht es: ~ 200 kWh<sub>el</sub> für Ventilation/Adsorptionsfilter; ~2000 kWh<sub>th</sub> für Desorption @ 100°C (Tobias Rüesch, Head R&D, climeworks AG, ebm-papst Symposium 27.10.16, Technorama Winterthur)  
 3) kyocera: "Market's highest SOFC power generation efficiency at 52%" <https://fuelcellsworld.com/news/kyocera-develops-industrys-first-3-kilowatt-solid-oxide-fuel-cell-for-institutional-cogeneration/>  
 4) PSI Magazin 5232 Nr. 01/2018, Neue Wege in die Energiezukunft, S.10ff  
 5) Transport & Environment; Published: October 2018; CNG and LNG for vehicles and ships - the facts; European Federation for Transport and Environment AISBL

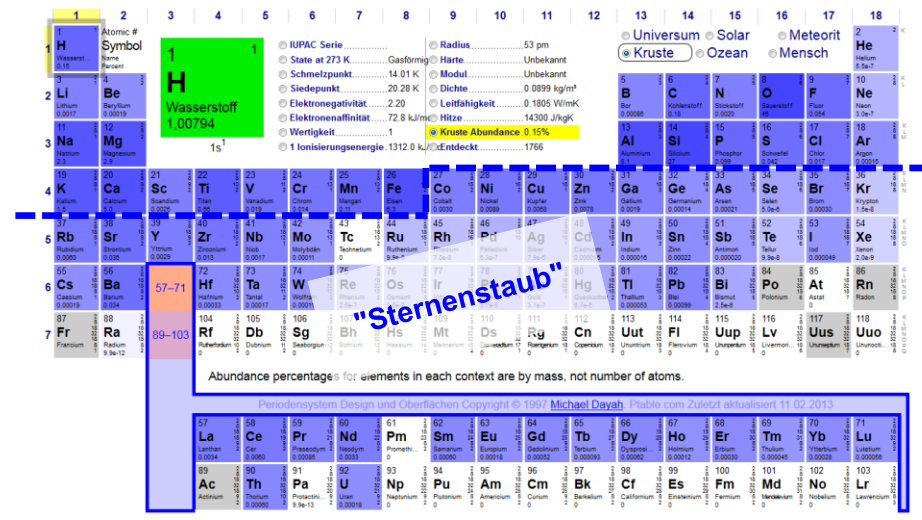
# 'Rohstoffe'



## ■ Häufigkeit in der Erdkruste



4.6 Mia. - Planet Earth  
Die Elemente unseres Periodensystems sind gesetzt



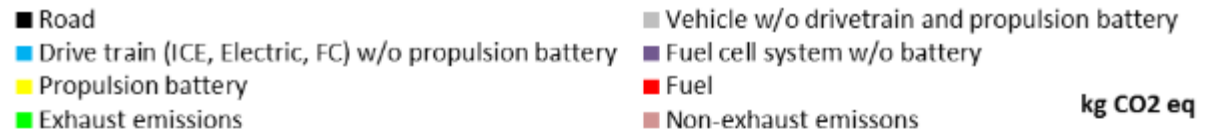
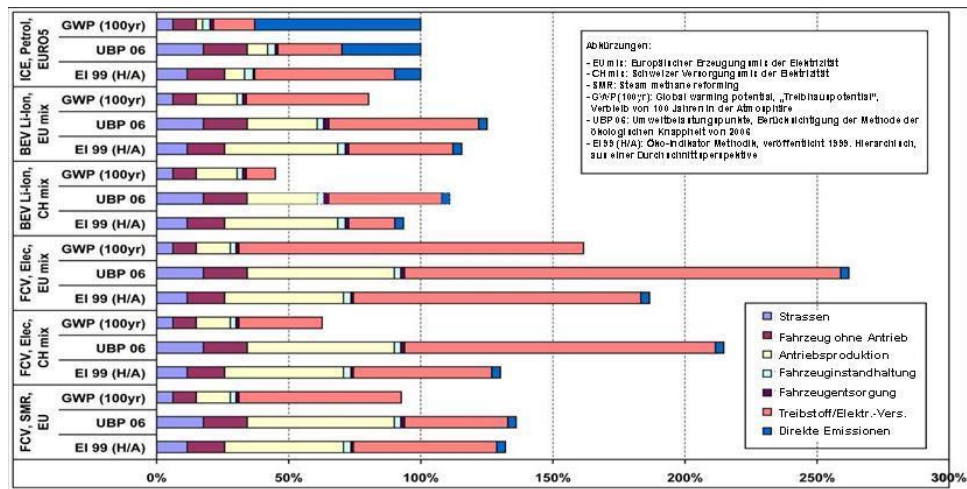
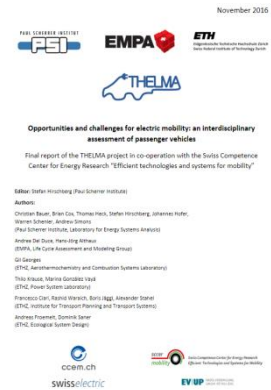
- Je schwerer die Elemente, desto seltener kommen sie vor
- Das Leben braucht die leichten Elemente (v.a.: H, C, N, O)

- Elektromobilität - Li-Ionen Batterien
- Elektromobilität - Elektromotoren

# Presse - Wissenschaft

## ETH-Bereich: THELMA 2016

- Lebenszyklusanalyse für die Umweltverträglichkeit von batteriebetriebenen elektrischen (BEV) und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen (FCV) relativ zum kraftstoffbetriebenen Fahrzeug mit internem Verbrennungsmotor (ICE). Dargestellt sind verschiedene Elektrizitätsmixe und Wasserstoffherzeugungsmethoden. Die Produktion und Nutzung von Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebssystemen werden miteinander verglichen. Die Analyse zeigt eine starke Abhängigkeit von der Art des verwendeten Energieträgers und den Produktionswegen des verwendeten Wasserstoffs und der Elektrizität. (Bauer & Simons, 2011)



"near future" 2020

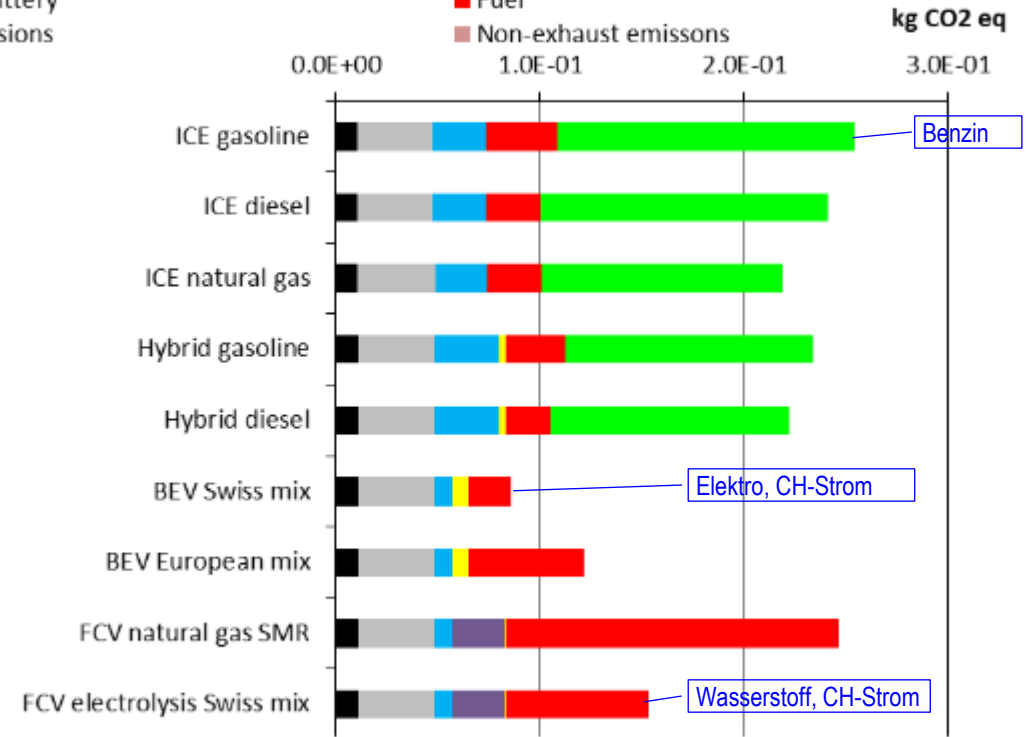


Figure 2.5 Life-cycle GHG emissions per km caused by selected midsize "near future" passenger vehicles as specified in Table 2-31 and Table 2-32.

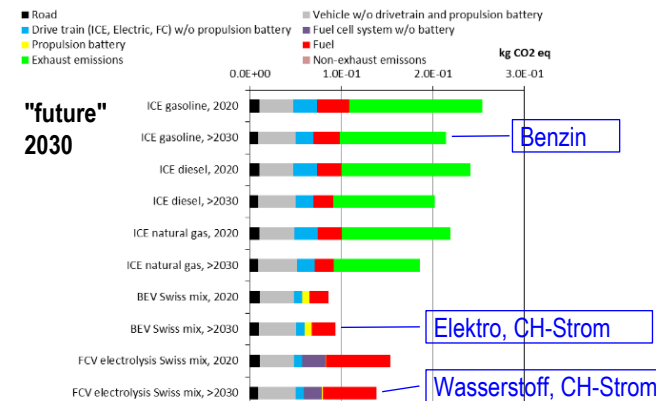


Figure 2.23 Life-cycle GHG emissions per km caused by future midsize vehicles as specified in Table 2-33 Table 2-31 and Table 2-34.

## ■ ETH-Bereich

### Abwarten ist bei Elektroautos die falsche Strategie

29.11.2017 | Zukunftsblog | Energie

Von: Prof. Anthony Patt, ETH Zürich | 12 Kommentare

Soll man auf Elektrofahrzeuge umsteigen oder besser andere Technologien abwarten? Aktuell stellen Elektroautos die einfachste Möglichkeit dar, den Strassenverkehr CO<sub>2</sub>-neutral zu gestalten. Sie sind ein unverzichtbarer Schritt hin zu einem saubereren Energiesystem, meint Anthony Patt.



Ist der Strom sauber, fährt das Auto umweltfreundlich. (Bild: jeremysil / iStock)

### Wenn Autos, dann Elektroautos – und zwar jetzt!

Wir können viel Gutes tun, indem wir weniger Auto fahren. Um die verbleibenden Autos auf den Strassen CO<sub>2</sub>-neutral zu machen, ist es am besten, sie mit Batterien statt Benzinmotoren auszustatten. Je schneller wir diesen Wandel vollziehen, desto besser.

- "Bis wir aber ein Wasserstoffversorgungssystem aufgebaut oder unsere Gasleitungen umgebaut haben, sind Elektroautos und ihre Infrastruktur noch viel weiterentwickelt. Dieses Rennen kann Wasserstoff nicht gewinnen."

<https://www.ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2017/11/elektroautos.html>

Energy & Mobility

### Sind Elektroautos umweltfreundlicher?

Der schwerste Vorwurf an die Adresse der Elektroautos lautet, dass sie mehr CO<sub>2</sub> ausstossen als Benziner. Verschiedene Studien treffen die unterschiedlichsten Annahmen (die alle falsch sind, soweit ich das beurteilen kann), um zu dieser Schlussfolgerung zu gelangen. Die einfachste ist, dass der Strom für Herstellung und Betrieb CO<sub>2</sub>-intensiv ist.

Natürlich gibt es Länder, die hauptsächlich auf Kohle und damit die schmutzigste aller Energiequellen setzen. Aber heute sprechen auch wirtschaftliche Faktoren gegen neue Kohlekraftwerke. Der Anteil der Kohle an der Energieproduktion sinkt.

Für das Klima müssen wir langfristig alle Emissionen aus der Energieerzeugung vermeiden. Dieser Übergang zu sauberer Energie hat bereits begonnen. Ob er schnell genug erfolgt, bleibt abzuwarten. Dennoch: Elektroautos werden jedes Jahr umweltfreundlicher und irgendwann auch CO<sub>2</sub>-neutral. Hingegen setzt jeder verbrannte Liter Benzin stets 2,3 kg CO<sub>2</sub> frei.

### Andere Brennstoffe machen das Rennen nicht

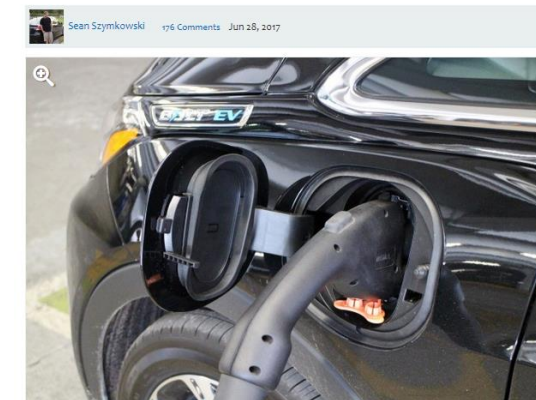
Wasserstoff ist als Energieträger grundsätzlich weniger effizient als Batterien. Für Wasserstoff spricht allerdings, dass er dieselbe Reichweite und Auftankzeit bietet wie normales Benzin. Noch vor einigen Jahren war das ein gewichtiges Argument – heute nicht mehr. Neue Elektroautos haben Reichweiten von mehr als 400 km, was für 99 Prozent aller Fahrten völlig ausreicht. Für das restliche Prozent besteht bereits heute ein Netz von Schnellladestationen an Autobahnraststätten. Bis wir aber ein Wasserstoffversorgungssystem aufgebaut oder unsere Gasleitungen umgebaut haben, sind Elektroautos und ihre Infrastruktur noch viel weiterentwickelt. Dieses Rennen kann Wasserstoff nicht gewinnen.

Zu den Biotreibstoffen: Sie ausreichend zu produzieren und damit herkömmliche Treibstoffe zu ersetzen, wäre verheerend für die Artenvielfalt, unsere Wasservorräte und die Nahrungsmittelproduktion.

Es ist aber auch möglich, mit erneuerbarer Energie aus Wasser und CO<sub>2</sub> flüssige Kohlenwasserstoffe herzustellen. Diese Power-to-Fuel-Technologie ist relativ preisgünstig, wenn das CO<sub>2</sub> aus Abgasen von der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammt. Um aber gar keine Emissionen zu produzieren, müsste das CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft kommen. Dies ist – hauptsächlich aufgrund des dafür nötigen Energieaufwands – sehr teuer. Ich bin überzeugt, dass wir auf diese Weise künftig Flugzeugtreibstoffe herstellen werden, weil es sonst keine realistische Möglichkeit gibt, Fliegen CO<sub>2</sub>-neutral zu gestalten. Dass diese Brennstoffe aber billiger werden als der Strom für den Fahrzeugantrieb, bezweifle ich stark.

[2] Szymkowski, S. Bizarre Swedish study claims electric cars are worse for the environment. Green Car Reports (2017).

### Bizarre Swedish study claims electric cars are worse for the environment



2017 Chevrolet Bolt EV electric car at Evgo fast-charging station, Newport Centre, Jersey City, NJ

Electric vehicles shouldn't be considered all-out carbon footprint saviors, but they can legitimately be viewed as the great minimizers.

The benefits of electric vehicles over those with internal-combustion engines are vast, but a strange new study is making rounds that claims electric cars are worse for climate-change emissions.

The study—conducted by IVL Swedish Environmental Research Institute and not peer-reviewed before publication—makes a handful of peculiar assumptions to reach its final conclusions.

- The study—conducted by IVL Swedish Environmental Research Institute and not peer-reviewed before publication—makes a handful of peculiar assumptions to reach its final conclusions.
- Overall, this study—much promoted by certain types of media outlets—can sadly be consigned to the "fake news" category. Proper, fact-based scientific analysis wins out again.

[https://www.greencarreports.com/news/1111266\\_bizarre-swedish-study-claims-electric-cars-are-worse-for-the-environment](https://www.greencarreports.com/news/1111266_bizarre-swedish-study-claims-electric-cars-are-worse-for-the-environment)

## ■ Wissenschaft: Ebenso enorme Bandbreite..

### "Schwedenstudie":

Mia Romare, Lisbeth Dahllöf (2017): *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*; IVL Swedish Environmental Research Institute

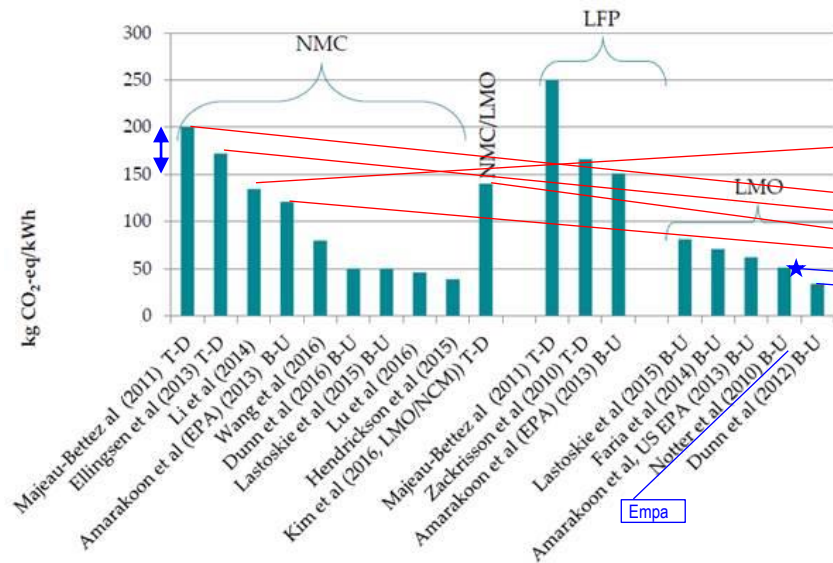


Figure 3: Calculated greenhouse gas emissions for different LCA studies of lithium-ion batteries for light vehicles for the chemistries NMC, NMC/LMO, LFP and LMO. T-D=Top-down approach for manufacturing and B-U is Bottom-Up approach.

a) How large are the energy use and greenhouse emissions related to the production of lithium-ion batteries?

The results from different assessments vary due to a number of factors including battery design, inventory data, modelling and manufacturing. Based on our review greenhouse gas emissions of 150-200 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh battery looks to correspond to the greenhouse gas burden of current battery production. Energy use for battery manufacturing with current technology is about 350 – 650 MJ/kWh battery.

- Werte für den CO<sub>2</sub>-Rucksack von Batterien variieren um ca. **Faktor 5** je nach Quelle
- Es gibt nur wenige Studien, welche die Batterieherstellung im Detail analysiert haben

## Bsp: 'Wie schlimm sind Batterien'

## ■ Laufende Wiederholung der gleichen Studien

Linda Ager-Wick Ellingsen, Christine Roxanne Hung, Anders Hammer Strømman 2017; *Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions*; *Transportation Research Part D* 55 (2017) 82–90  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.028>

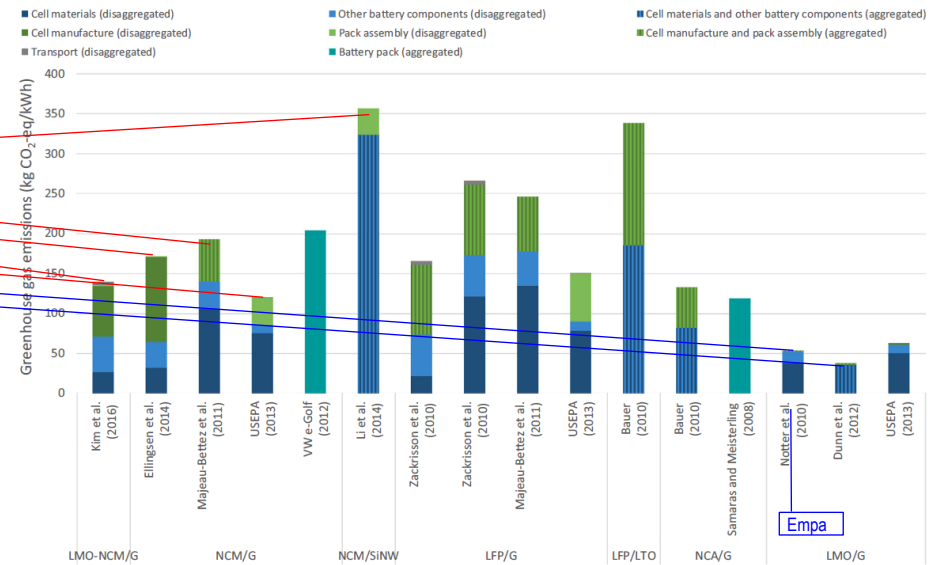


Fig. 1. GHG emissions of battery production.

- Die meisten Studien sind Reviews von anderen Studien.
- Die Katze beißt sich in den Schwanz, immer wieder dieselben Autoren...
- Publish or perish - Dieselben Forscher publizieren mehrmals über das gleiche Thema, jedoch mit anderen Kollegen und in anderen Journals.
- -> Häufig genannte Werte erscheinen 'wahr', obwohl sie nicht auf einer fundierten Grundlage beruhen müssen.

# Press - Scientific who is 'right'?

## Plausibility Check

Linda Ager-Wick Ellingsen, Christine Roxanne Hung, Anders Hammer Strømman 2017; Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions; Transportation Research Part D 55 (2017) 82–90  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.028>

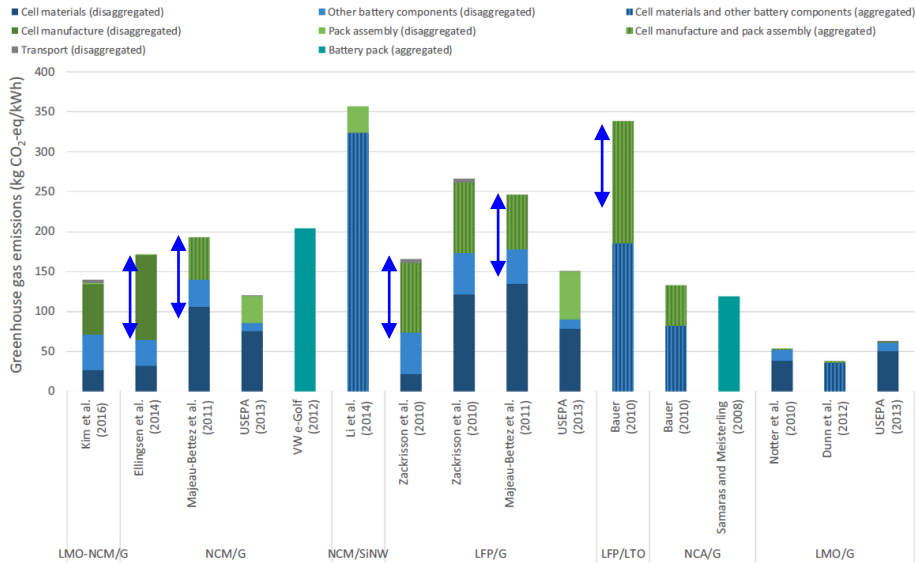


Fig. 1. GHG emissions of battery production.

Table 3 Cell data

Study	Cell energy density (kWh/kg)	Direct use in cell manufacture (MJ/kWh)	GWP resulting from direct energy use in cell manufacture (kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh)	GWP of battery (kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh)	Energy reference
Notter et al. (2010)	0.143	3.1	0.90	53	Authors' own estimates
Bauer (2010)	0.069–0.176	326–1,062	50–152	133–338	Hitachi Maxell (2003, 2005)
Zackrisson et al. (2010) <sup>a</sup>	0.103–0.104	790–791	55–141	166–266	Saft (2008)
Majeau-Bettez et al. (2011) <sup>a</sup>	0.110–0.140	371–473	56–70	200–250	Rydén and Sandén (2005)
Dunn et al. (2012b) <sup>b</sup>	0.148	10.7	2.3	38	Dunn and colleagues (2012a); Tagawa and Brodd (2009)
USEPA (2013) <sup>c</sup>	0.139–0.167	0–28.3	0–1.8	63–151	Proprietary; Majeau-Bettez and colleagues (2011)
This article LBV	0.174	586	107	172	Primary
This article ASV	0.174	960	175	240	Primary
This article AVV	0.174	2,318	424	487	Primary

Ellingsen et al., 2014

according to Ellingsen, Majeau-Bettez, Zackrisson, Bauer, ...

- Ellingsen et al. identified the energy demand in cell manufacturing as the point with the highest differences from study to study



- approx. 100 kg CO<sub>2</sub>eq/kWh battery from the manufacture and assembly step for 1 kWh of a battery (~6..10 kg)  
-> is 100 kg a lot or not?

Energy/oil spent to produce 100 kg CO<sub>2</sub>eq

- 100 kg CO<sub>2</sub> result from the combustion of 32 kg of oil (3.15 kgCO<sub>2</sub>/kg\_oil) containing 1344 MJ (373 kWh) of energy (Hu = 42 MJ/kg\_oil)
- 1 kWh battery weights ~10 kg (with a low energy density of 100 Wh/kg)

-> 32 kg of oil or 1344 MJ (373 kWh) used to assemble 1 kWh (10 kg) of a battery

plausibility: energy to disintegrate a battery as upper limit  
660°C melting point of Al (Separator 150°C, Electrolyte <100°C)

- How much energy is needed to heat up 1 kWh of battery (~10 kg) to 660°C when even Al melts?  
heat capacity estimate: cp≈1 kJ/kgK (mix of battery components)  
10 kg \* 1 kJ/kgK \* (660K-20K = 6'400 kJ > 6.4 MJ)
- How much oil is needed to heat up 1 kWh of battery (~10 kg) to 660°C?  
The heating value of oil is 42'000 kJ/kg oil (Hu = 42 MJ/kg)  
6'400 kJ / 42'000 kJ/kg\_oil = 0.15 kg\_oil -> 150 grams of oil

-> 150 g of oil or 6.4 MJ needed to heat up 1 kWh (10 kg) of a battery to 660°C, this would destroy the battery to the point where even Aluminium melts.

-> 25 g of oil or 1 MJ needed to heat up 1 kWh (10 kg) of a battery to 100°C, enough for the electrolyte to go up in flames.

- -> The GHG-values for the battery assembly of most studies would mean that several 100 times higher assumptions were made than the amount of energy which would be enough to disintegrate the battery.



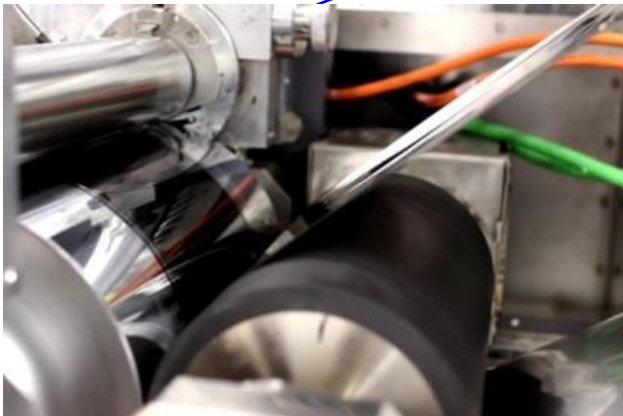
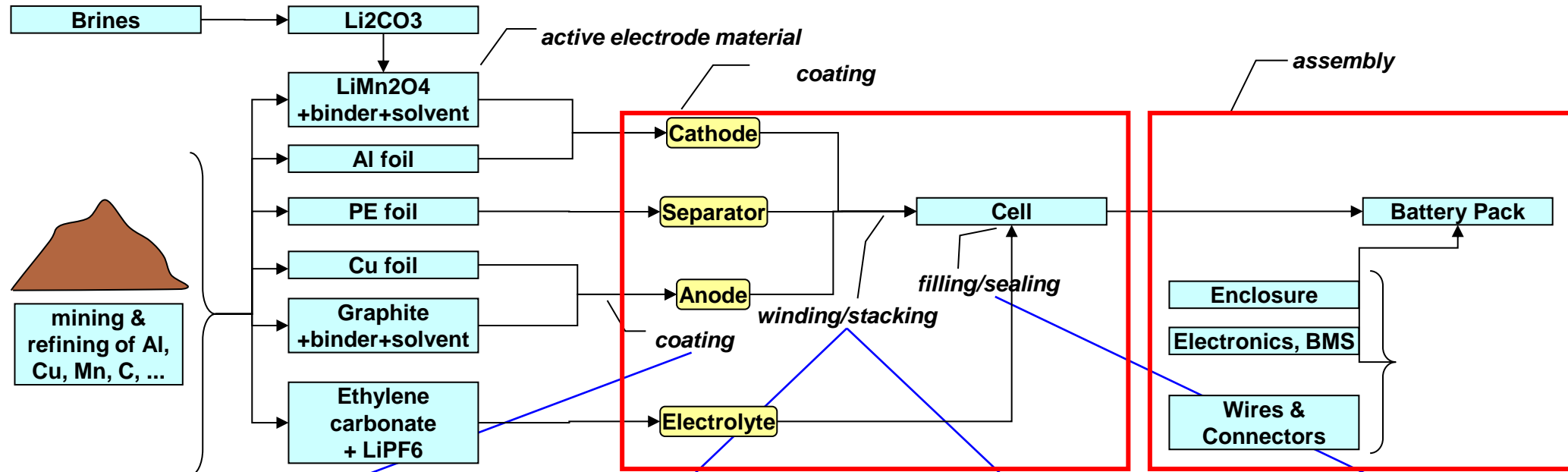
# Press - Scientific who is 'right'?

- Plausibility check 2: Comparison with Tesla Gigafactory



- Planned battery output: **35 GWh/a** 35'000 MWh/a 35'000'000 kWh/a
- On the roof with an area of 530'000 m<sup>2</sup> : **70 MWp PV-panel** 70'000 kWp  
 annual electricity production: ~70'000 kWp \* 1500 kWh/kWp = **100'000'000 kWh/a** (100 Mio. kWh/a)
- The PV energy from the roof must be enough to produce the batteries
  
- **How much max. energy for the assembly of kWh battery?**  
 $100'000'000 \text{ kWh} / 35'000'000 \text{ kWh}_{\text{batt}} = \text{max. } 3 \text{ kWh}_{\text{el}} \text{ per kWh}_{\text{battery}}$  (~10 MJ/kWh)
  
- **How much CO<sub>2</sub>-emissions for the assembly of 1 kWh battery:**
  - Best case:  
**CO<sub>2</sub>-footprint of 3 kWh<sub>el</sub> from photovoltaics to produce 1 kWh battery?**  
 $3 \text{ kWh} * 0.080 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh} = 0.24 \text{ kg CO}_2\text{eq per kWh}_{\text{battery}}$
  - Worst case:  
**CO<sub>2</sub>-footprint of 3 kWh<sub>el</sub> from a coal electricity to produce 1 kWh battery?**  
 $3 \text{ kWh} * 1.200 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh} = 3.6 \text{ kg CO}_2\text{eq per kWh}_{\text{battery}}$
  
- The **upper limit** for the assembly energy of 1 kWh battery at Tesla is **3 kWh** (10 MJ)
- The most extreme case (coal electricity) would mean **3.6 kg CO<sub>2</sub>eq per kWh<sub>battery</sub>** (Ellingsen et.al.: ~100 kg CO<sub>2</sub>eq/kg<sub>battery</sub>)

# Fokus: Li-Ionen Batterie - Herstellung



# Rohstoffe - Li

## ■ Ist Lithium wirklich knapp?



	1	IA	
1	1	<b>H</b> hydrogen 1.0079	2
			IIA
2	3	<b>Li</b> lithium 6.941	4
			<b>Be</b> beryllium 9.0122
3	11	<b>Na</b> sodium 22.990	12
			<b>Mg</b> magnesium 24.305
			20

- Li ist das leichteste Metall (Dichte = 0.543 kg/l)
- Höchstes elektrochemische Potenzial ( $E^0 = -3,04 \text{ V}$ )
- Reagiert in metallischer Form heftig mit  $\text{O}_2$  (brennt!)
- Relativ häufig (in der Erdkruste häufiger als Cu), ca. USD 20.-/kg
- Wird aus Salzseen und aus Minen gewonnen (Ozean!?)
- Ungiftig (wird als Medikament verwendet)
- **nur ca. 2% der Batteriemasse ist Lithium**

# Lithiumabbau und Umweltbelastungen

## Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aus Salzseen



19.3..52.3 Mt  
20..1'500ppm  
72'000 kWh/t

## Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aus Minen (Spodumen)



10.5..11.7 Mt  
5'100..14'000ppm  
143'000 kWh/t

## Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aus Meerwasser/Entsorgung



224'000 Mt  
0.17ppm  
56'000'000 kWh/t  
28'000'000 kWh/t

- Die Produktionsprozesse für Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aus Sole (Salzsee) und Spodumen (Gestein) unterscheiden sich in Bezug auf die Umweltauswirkungen nicht sehr stark, aber aus Meerwasser liegen sie eine Größenordnung höher.
- Auf Batterie-Ebene schwindet der Herkunftseinfluss und auf Fahrleistungs-Ebene (vkm) ist er kaum erkennbar.
- Selbst bei der energieintensiven Produktion von Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aus Meerwasser bleiben die ökologischen Vorteile der E-Mobilität erhalten.



Li-ion Batterie



Transport (EV)

Production of lithium carbonate used for Li-ion batteries: Are we facing an environmental bottleneck?

Anna Stampf\*, Daniel J. Lang\*, Patrick Wäger\*  
\*Empa, Technology and Society Laboratory, 8600 Dübendorf, Switzerland; \*ETH Zürich, Institute for Environmental Decisions, 8092 Zürich, Switzerland; \*Leuphana University, Institute of Ethics and Transdisciplinary Sustainability Research, 21335 Lüneburg, Germany

LCIA Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> production [kg]

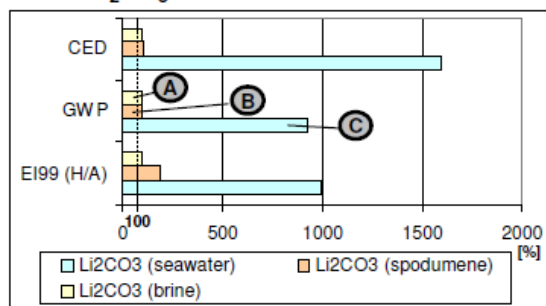


Figure 5: LCIA results for Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> production from the three resource types (brine = 100%, spodumene, seawater)

LCIA Li-ion battery production [kg]

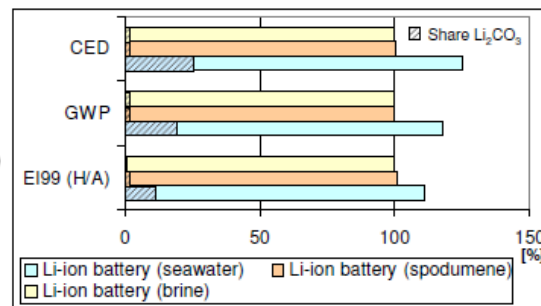


Figure 6: LCIA results for Li-ion battery production, with the Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stemming from the three resource types (brine = 100%, spodumene, seawater)

LCIA Transportation [vkm]

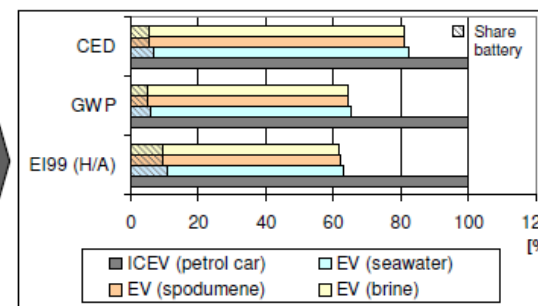
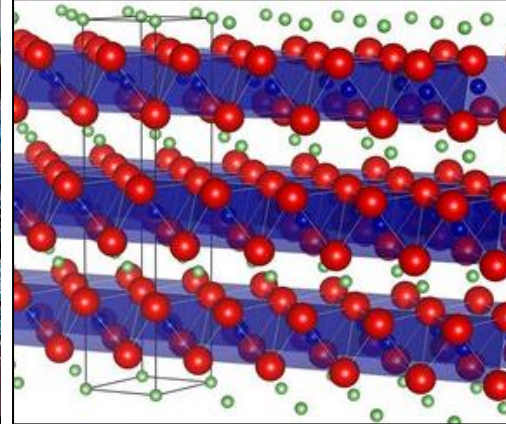


Figure 7: LCIA results for transportation with an EV, with the Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stemming from the three resource types, compared to a vkm of a conventional internal combustion engine vehicle (ICEV = set to 100%)

# Rohstoffe - Co

## ■ Ist Cobalt wirklich schlimm?



<https://www.thestar.com/business/2018/12/18/osc-approves-30m-settlement-with-katanga-over-failed-drc-risk-disclosure.html>

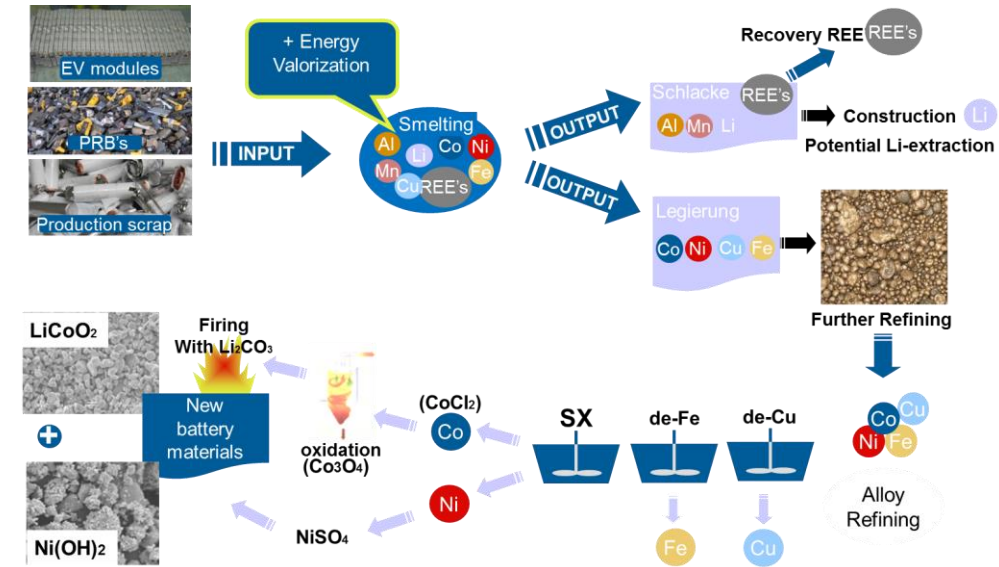


- Co liegt im Periodensystem zwischen Fe und Ni ( $\pm 1$  Proton, Cu +2)
- Häufig gebraucht als Legierungsbestandteil, z.B. in Flugzeugturbinen
- Förderung meist als Nebenprodukt von Cu oder Ni, ca. USD 50.-/kg
- etwas seltener in der Erdkruste als Cu, Ni, Cr
- Bestandteil von Vitamin B12 (Cobalamin), sehr wichtig für Wiederkäuer
- Ca. 75% stammt aus grossen Minen (Congo), 13% aus Artisanal- und Kleinbergbau\* mit nachweislich enormen sozialen Problemen
- **Anteil Cobalt in Batterie: ~ 8% bei NMC 1:1:1, ~ 3% bei NMC 8:1:1**

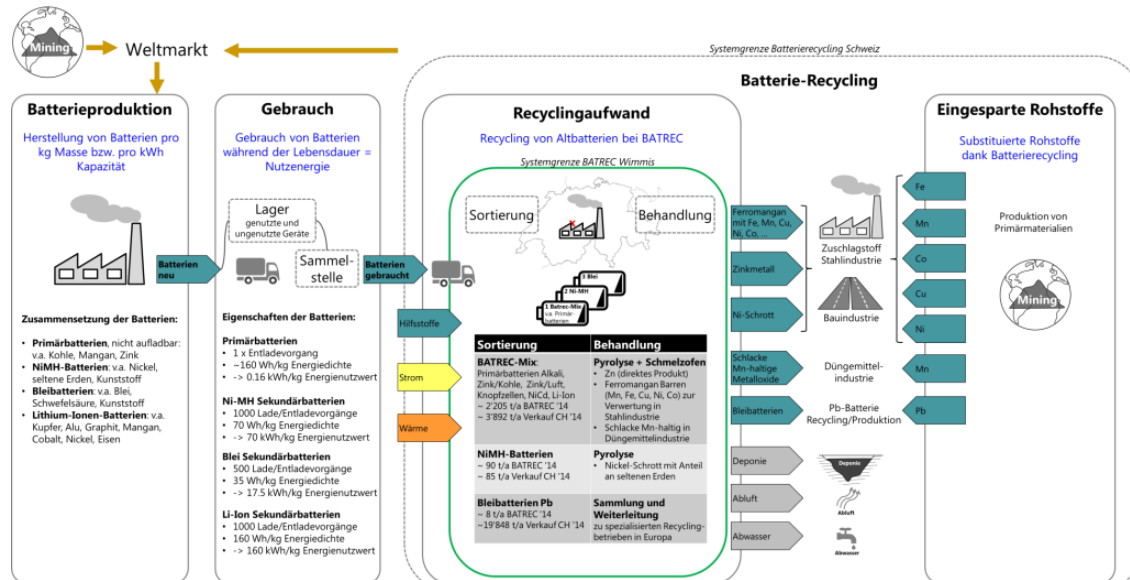
# Rohstoffe - Recycling von Li-Ionen-Batterien

- Etabliert sind pyro- und hydro- metallurgische Verfahren.
- Andere Verfahren, die strukturerhaltend sind, gibt es in Pilotanlagen oder im Labormassstab.
- Zwar könnte Li zurückgewonnen werden, aber das heutige Hauptziel sind Co, Cu, Ni.
- Wirtschaftlichkeit vs. Nachhaltigkeit: Zentrales Thema.
- Anreize/Auflagen könnten erforderlich sein, um eine weitergehende Rückgewinnung (Li, Al, Graphit) zu erzielen.

pyro -metallurgical LIB recycling process of Umicore (Hoboken BE)



Prospective Environmental Assessment of Lithium Recovery in Battery Recycling, Carl Vadenbo, master thesis, ETHZ/Empa 2009



Grafik Empa, Recyclingsystem CH

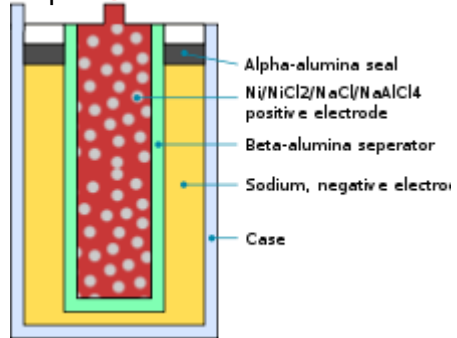
## Batterie-Recycling in der Schweiz und in der EU ist gesetzlich vorgeschrieben

- Sammelsystem Inobat
- Recyclinganlage: Batrec in Wimmis mit Pyrolyse und Schmelzofen

# Batterietrends...

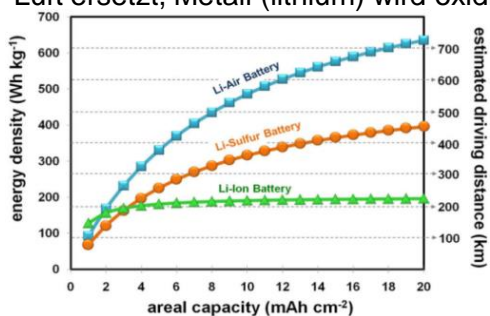
- Schwefel, Natrium, Magnesium, Aluminium, ...
- Li-Metall Anode
- Solid-state Elektrolyten: Titanitrid, (Bor, Al, ...)
- Natrium Nickelchlorid (ZEBRA Batterie), NaS (NGK)
- 'Luft - Metall' Batterien z.B. Li-Air
- alternative Technologie: Redox-Flow Batterien
- allgemeiner Trend: Reduktion von Cobalt, NMC 811

'**Molten Salt**' ...älteres Prinzip, dank Fortschritten bei Keramik-Separatoren neu belebt.



Empa, Fraunhofer etc.

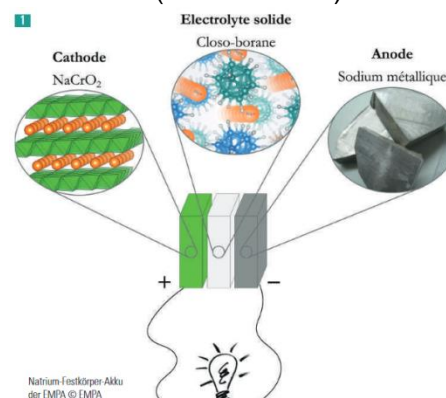
**The Holy Grail** Eine Elektrode wird durch Luft ersetzt, Metall (lithium) wird oxidiert



**Akkus aus Graphit-Abfall** Forschung der ETH Zürich und Empa. Akku aus den am häufigsten vorkommenden Elementen der Erdkruste (z.B. Mg, Al)

<https://www.ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2018/04/neue-materialien-fuer-nachhaltige-billigbatterien.html>

**Natrium Festkörper** Forscher der Empa und der Uni Genf haben einen neuartigen Natrium-Festkörper-Akku entwickelt (closo-borane)



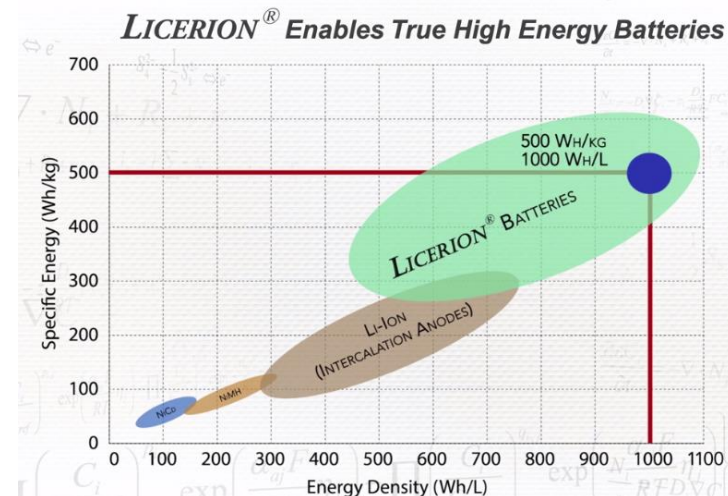
Empa: [http://www.sjf-ajs.ch/wp-content/uploads/2018/11/Sellin-Ruediger\\_Quantenspruege-fuer-die-Stromspeicherung.pdf](http://www.sjf-ajs.ch/wp-content/uploads/2018/11/Sellin-Ruediger_Quantenspruege-fuer-die-Stromspeicherung.pdf)

**Glass-Battery:** University Texas in Austin, John Goodenough, 1 min. charge

**Dry Electrode Maxwell/Tesla**  
Beteiligung von Tesla an Maxwell, >300Wh/kg, Co-free, low cost

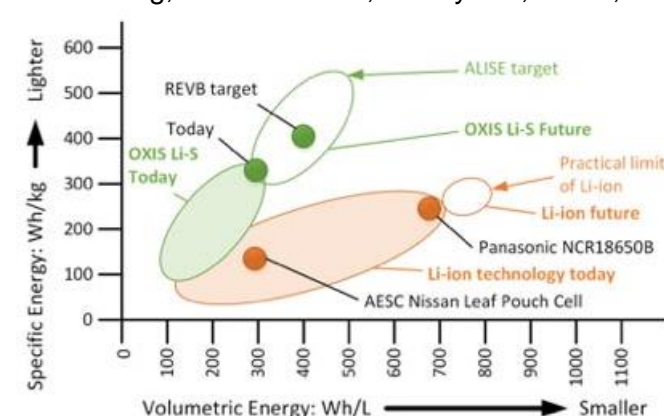
<http://investors.maxwell.com/investors/news-and-events/press-releases/press-release-details/2019/Maxwell-Technologies-Announces-Definitive-Merger-Agreement-with-Tesla-Inc/default.aspx>  
[http://s21.q4cdn.com/566123494/files/doc\\_presentations/2019/Maxwell-Needham-Conference-Deck.pdf](http://s21.q4cdn.com/566123494/files/doc_presentations/2019/Maxwell-Needham-Conference-Deck.pdf)

**Lithium Metal** sionpower.com, Li-met, Ni-rich cathode, ceramic protection, 500 Wh/kg; 1000 Wh/l (3C charge, 1/3C discharge, 450 cycles)



<https://sionpower.com/products/>

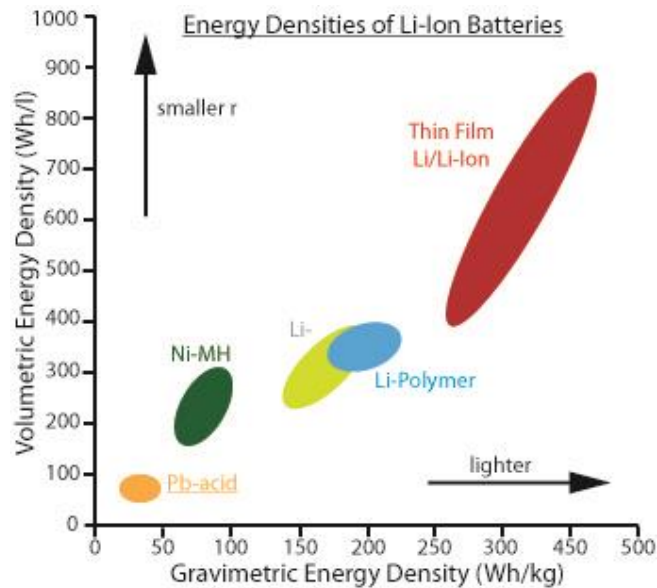
**Lithium Schwefel** oxisenergy.com, Li-met, S<sub>8</sub>, 400 Wh/kg, dch 2C ch C/4, 200 cycles, -60°C,



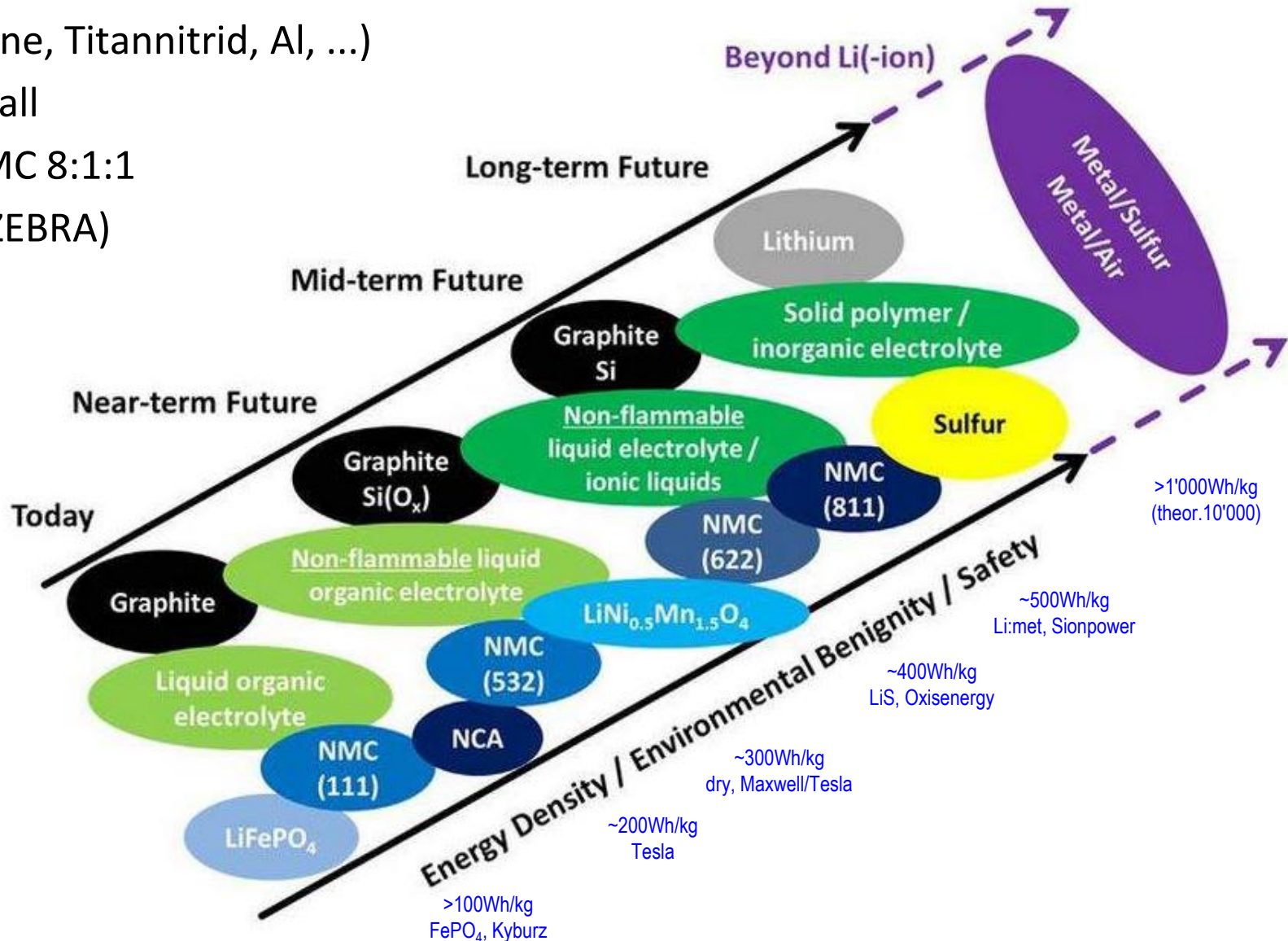
<https://oxisenergy.com/technology/>

# Batterietrends...

- Schwefel, Natrium, Magnesium, Aluminium, ...
- Solid-state Elektrolyten (closo-borane, Titannitrid, Al, ...)
- Anode: Graphit mit Silizium, Li-Metall
- Kathode: Reduktion von Cobalt, NMC 8:1:1
- Alternativ: Natrium Nickelchlorid (ZEBRA) und Redox-Flow Batterien
- 'Luft - Metall' Batterien z.B. Li-Air



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ragone\\_Plot\\_for\\_diff\\_Li\\_batteries.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ragone_Plot_for_diff_Li_batteries.jpg)



[Bresser, D. et al. 2018]; Batterieforum Deutschland Berlin, Jan. 2019 Marcel Weil, M et al., Helmholtz Institute Ulm (HIU)



# Take home...

- **Energie** -> **Erneuerbar**
- **Rohstoffe** -> **Elements of hope, schlanke Autos, gutes Recycling**
- **Treibstoffe** -> **verschiedene, aber:**
  - \* Kürzere und mittlere Strecken (100km?):
    - *Vorwiegend Strom, je mehr erneuerbar desto besser*
  - \* Langstrecken (100'e km?):
    - *Fossile Treibstoffe und 'gute' Biotreibstoffe (aus Reststoffen)*
    - *Ev. aus Wasserstoff abgeleitete Treibstoffe ("Stromüberschuss"?)*
    - *Strom! 2035: 600km mit 300kg-Batterie*
  - \* Flugzeuge (1000'e km):
    - *Fossile Treibstoffe und 'gute' Biotreibstoffe (aus Reststoffen)*

Der Strombedarf der Elektrifizierung der gesamten CH-Mobilität würde ca. **20% des heutigen Strombedarfs** (~65 TWh) betragen. Dafür spart man 100% des heutigen Benzin/Dieserverbrauchs.

- > Der Strom **muss und kann** aus **erneuerbaren Quellen** stammen.
- > Herausfordernd ist die **Speicherung** über längere Zeit.

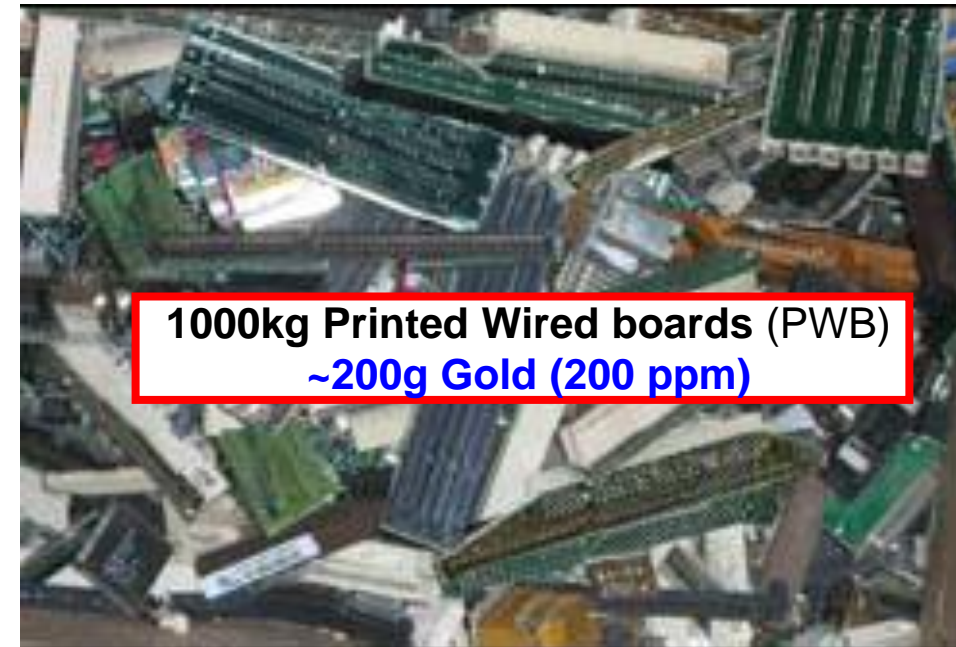
**Merci**

marcel.gauch@empa.ch  
Technology & Society Lab @ Empa

# Natürliche Mine

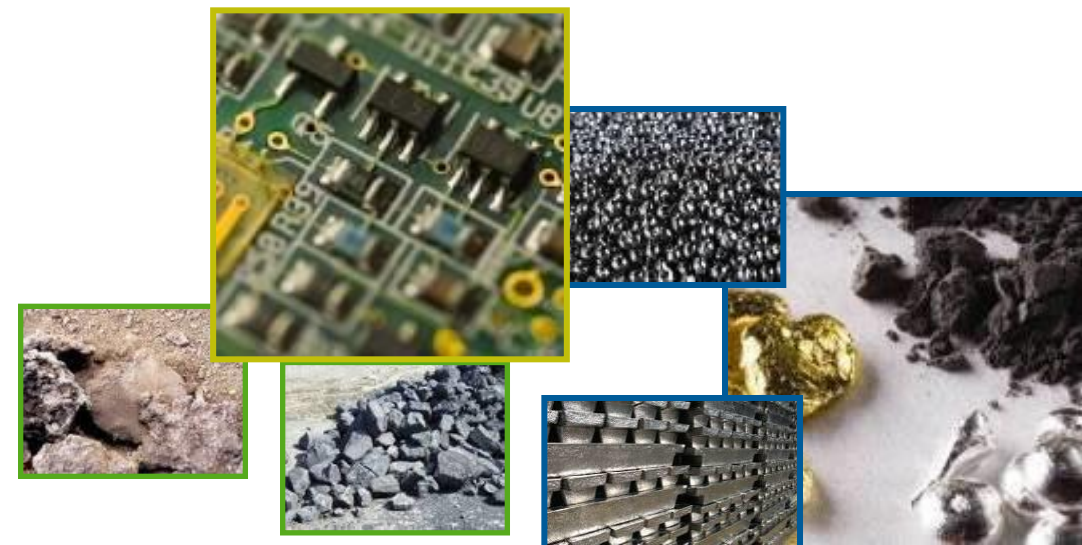
vs.

# Urbane Mine



Grösste Mine: **Muruntau** Uzbekistan, ca. 60t Au/a  
3.5 x 2.5 km, Tiefe 600m

Tiefste: **Mponeng-Mine** in Südafrika  
ca. 4000 m Tiefe



Photos: umicore

# Recovery of precious metals from e-Waste, Umicore (Be)

Fotos: umicore



**1000kg Printed Wired boards (PWB)**  
**200g Gold**

**285kg base, precious und special metals**  
**180.5g Gold**



**Recovery efficiency:**  
**>90%**



# Recovery of precious metals from e-Waste, India

1000kg Printed Wired boards (PWB)  
200g Gold



Fotos: Empa



Recovery efficiency:  
 $\approx 25\%$

51g Gold

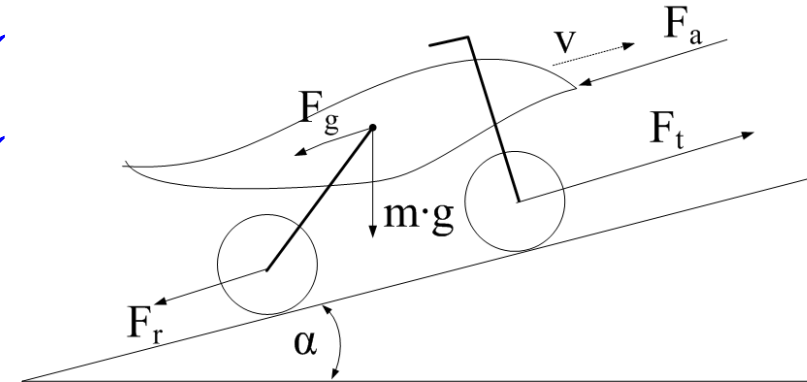
# Physik der Mobilität

- altbekannt...
- anwendbar auf sämtliche Formen von Bewegung



Isaac Newton's laws of motion and gravity, 1687 "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica"

- Luftwiderstand = f(Form, Grösse)**
- $F_{Luft} = \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v^2$        $m^2 \downarrow$        $c_w \downarrow$
  - Rollwiderstand = f(Gewicht, Reifen)**  
 $F_{Roll} = (m_{Fz} + m_{Zu}) \cdot g \cdot k_{Roll} \cdot \cos(\alpha)$        $kg \downarrow$        $\mu \downarrow$
  - Steigungswiderstand = f(Gewicht)**  
 $F_{Steig} = (m_{Fz} + m_{Zu}) \cdot g \cdot \sin(\alpha)$        $kg \downarrow$
  - Beschleunigungswiderstand = f(Gewicht)**  
 $F_B = (e_i \cdot m_{Fz} + m_{Zu}) \cdot a$        $kg \downarrow$



**Gesamte Antriebskraft = Summe der Einzelkräfte**

$$F_{Antrieb} = F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Steig} + F_{Beschl}$$

**Antriebsleistung**

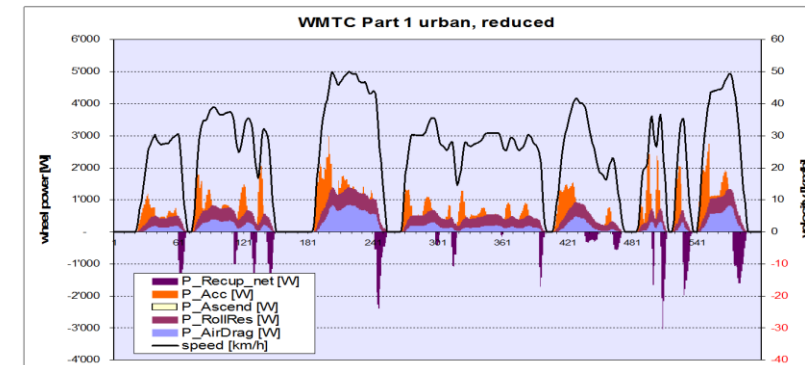
$$P_{Antrieb} = F_{Antrieb} \cdot v \quad (\text{Leistung} = \text{Kraft} \cdot \text{Geschwindigkeit})$$

**Antriebsenergie**

$$Q_{Antrieb} = P_{Antrieb} \cdot t \quad (\text{Energie} = \text{Leistung} \cdot \text{Zeit})$$



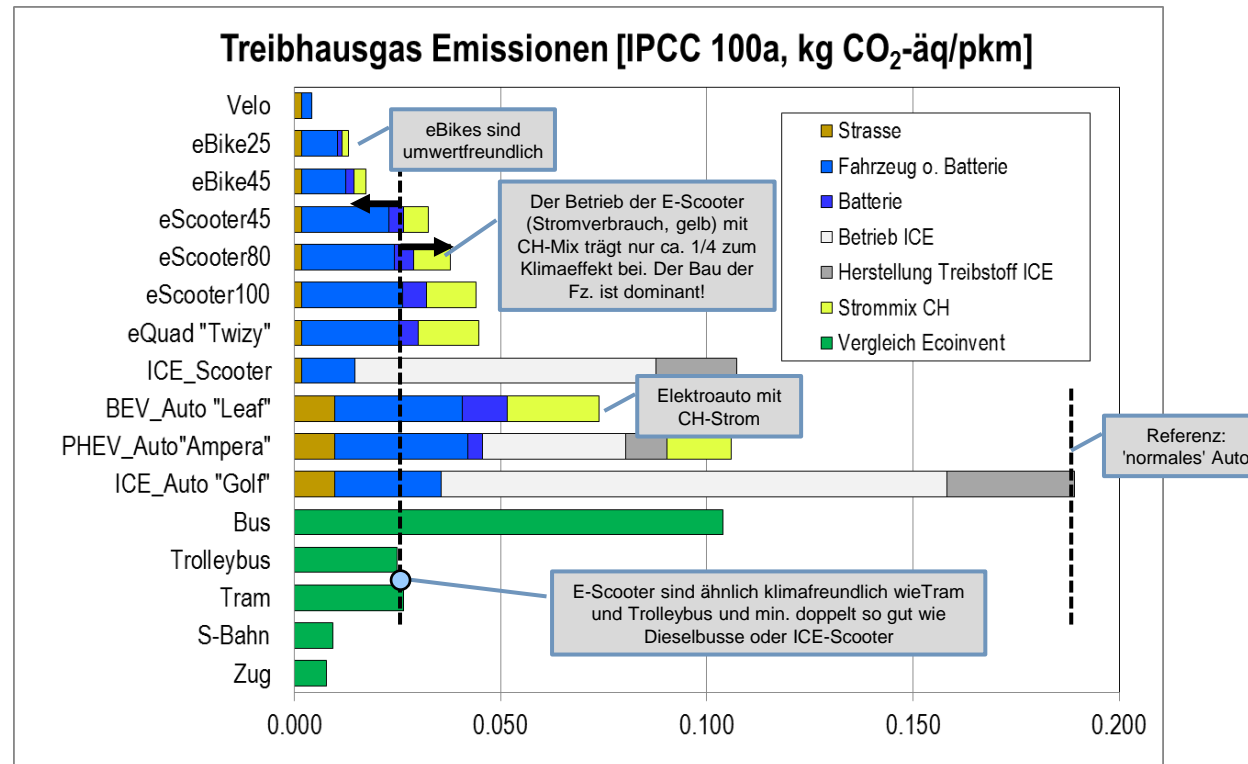
Praktische Überprüfung auf dem Empa Dynamometer. Messverfahren nach Standardprozeduren



Theoretische Berechnungen des Leistungsbedarfs eines e-Scooters im WMTC-Zyklus

# Optionen für Mobilität

## ■ Treibhausgasemissionen: Vom Velo bis zum Zug pro Personen- Kilometer

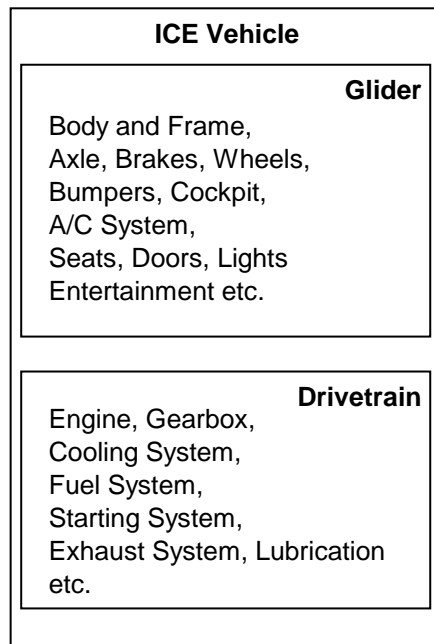


Grafik: BFE 2013; E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz; Schlussbericht 2013

# Vergleich Ökobilanz: ICE <-> EV

## ICEV

7.5 l/100km  
(6.0l/100km NEDC)



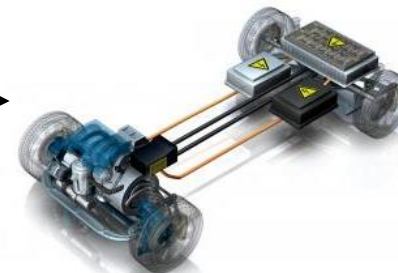
## Auto Produktion und Betrieb



Picture: VW, The Golf – Environmental Commendation Background Report, 2008



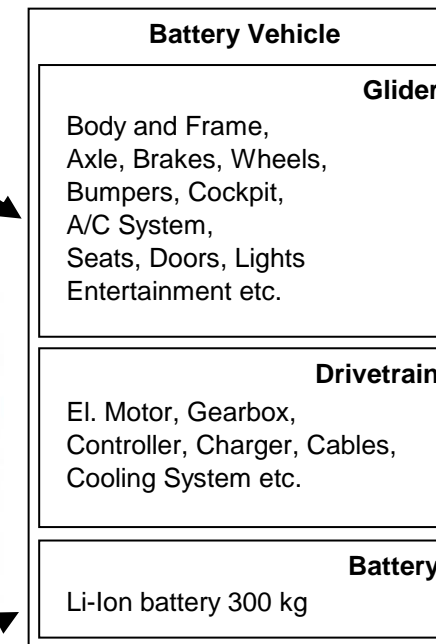
Picture: VW 1.4T



Picture: Internet

## EV

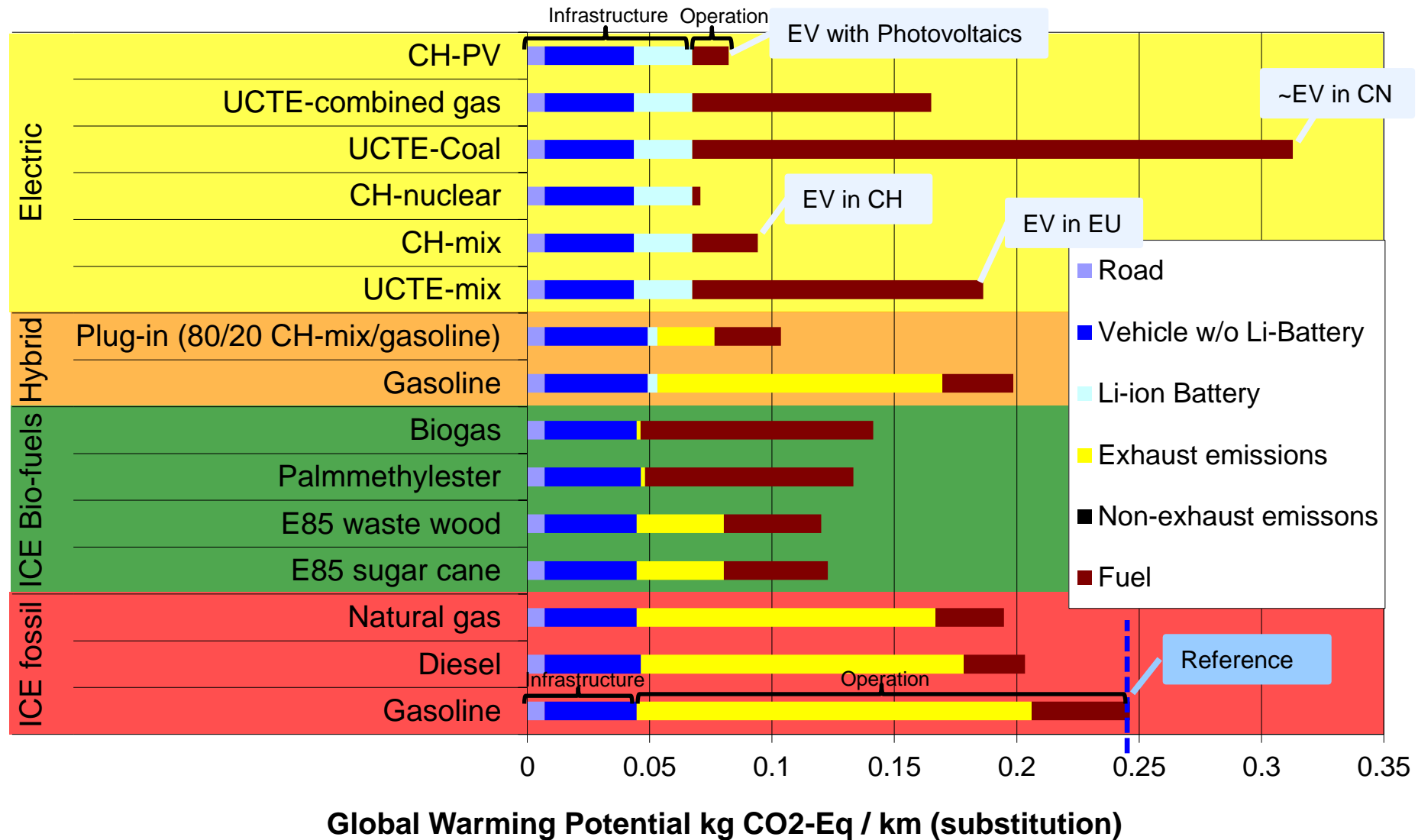
24.3 kWh/100km  
(14.5kWh/100km NEDC)



Picture: Empa

**Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles.**  
Dominic A. Notter\*, Marcel Gauch, Rolf Widmer, Patrick Wäger, Anna Stamp, Rainer Zah and Hans-Jörg Althaus  
Environ. Science & Technology, No.44/2010 p.6550-6556; DOI: 10.1021/es903729a

# Resultat: CO<sub>2</sub>, Treibhauseffekt (GWP)



Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen.

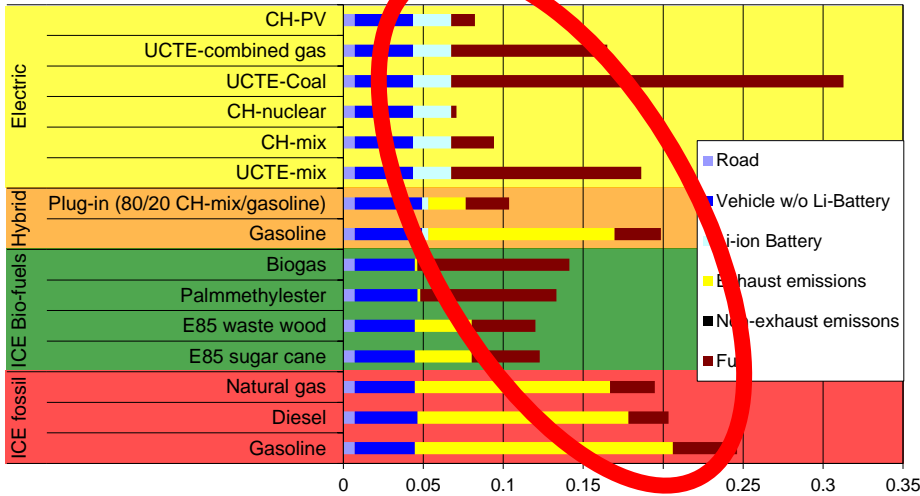
Hans-Jörg Althaus, Marcel Gauch, Study on behalf of Swiss utility company AXPO, published 09.02.2011.

Study download: [www.empa.ch/mobility](http://www.empa.ch/mobility) and [www.axpo.ch/content/axpo/de/home\\_multi/medien/medienmitteilungen/2011/februar/e-mobil-studie\\_plug-in-hybrideambesten/\\_jcr\\_content/content/download\\_0/downloads/e\\_mobil\\_studie.pdf?download](http://www.axpo.ch/content/axpo/de/home_multi/medien/medienmitteilungen/2011/februar/e-mobil-studie_plug-in-hybrideambesten/_jcr_content/content/download_0/downloads/e_mobil_studie.pdf?download)



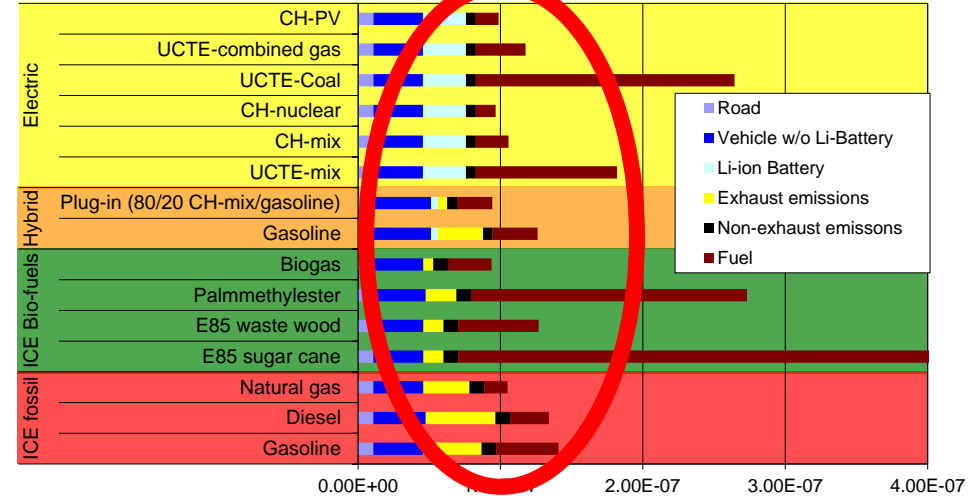
# Ist CO<sub>2</sub> genügend als Umweltindikator?

GWP



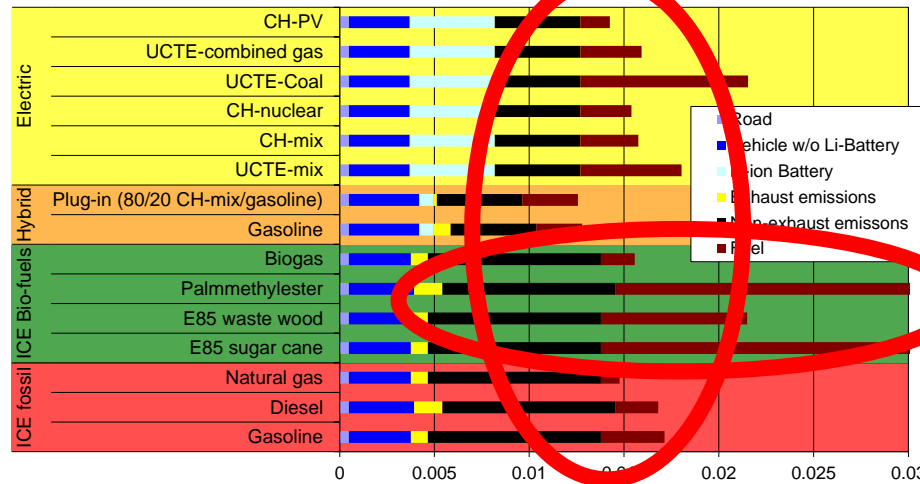
Global Warming Potential kg CO<sub>2</sub>-Eq / km (substitution)

EI 99, Human health damage



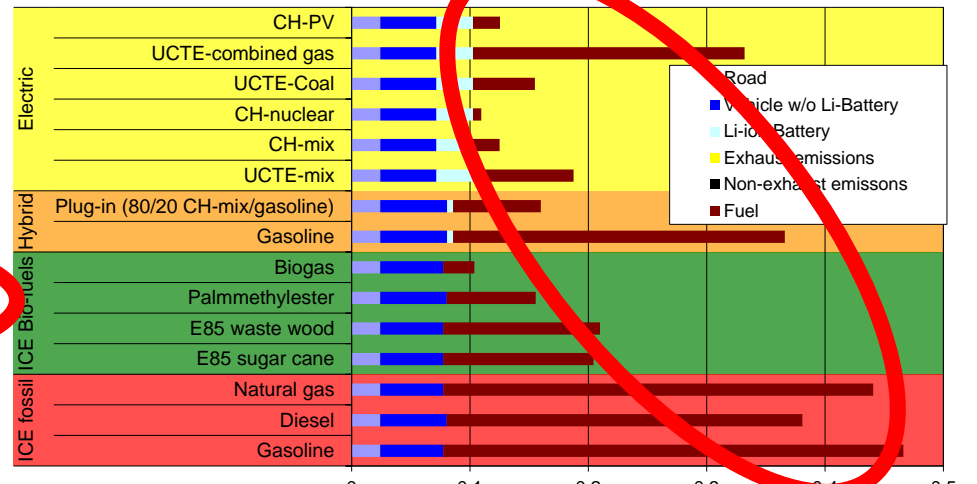
Human health damage, Ecoindicator 99 (H) DALY / km (substitution)

EI 99, ecosystem damage



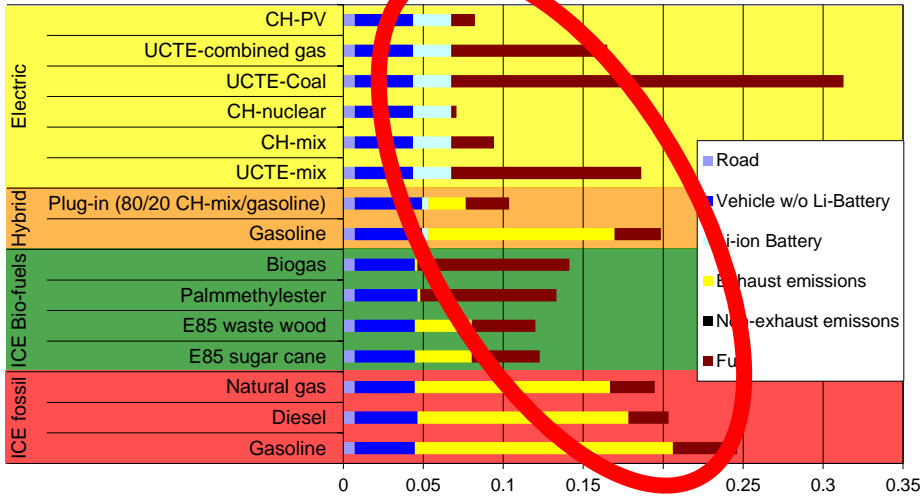
Ecosystem damage, Ecoindicator 99 (H) pdf\*m<sup>2</sup>\*a / km (substitution)

EI 99, Resource damage



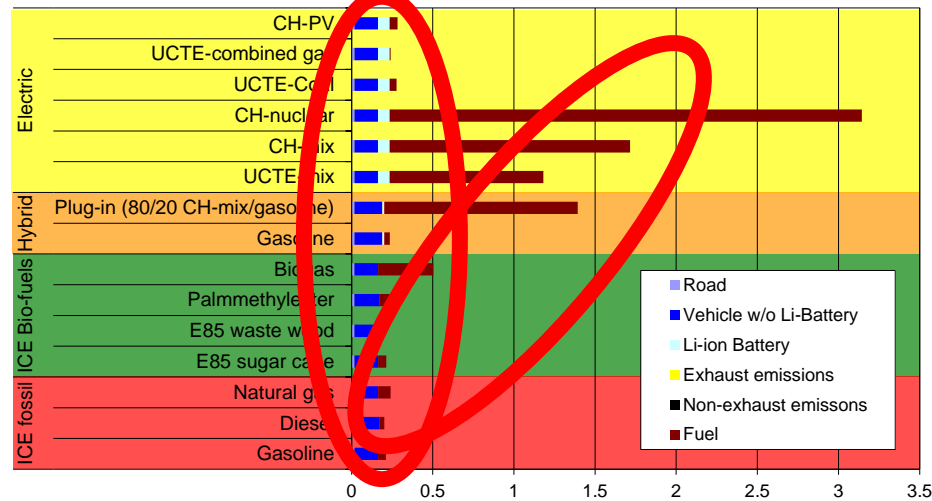
Ressourcenschaden, Ecoindicator 99 (H) MJ-surplus / km (substitution)

# Ist CO<sub>2</sub> genügend als Umweltindikator?



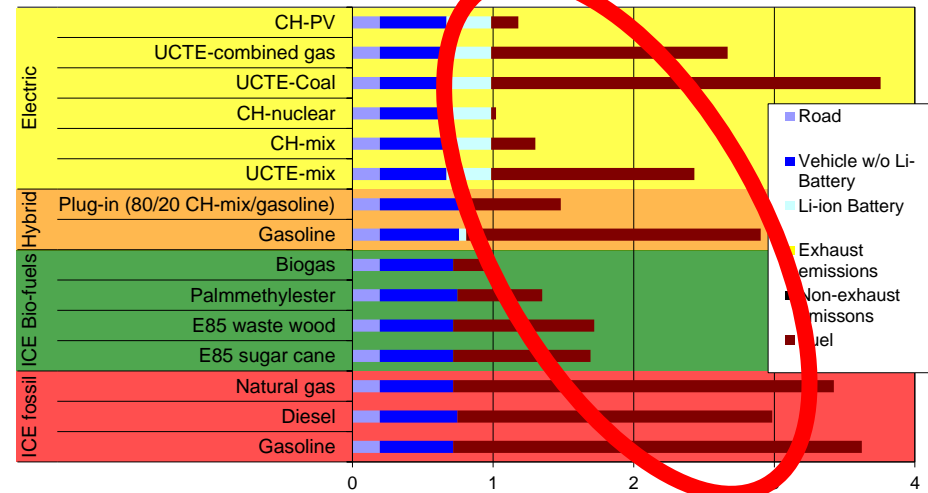
Global Warming Potential kg CO<sub>2</sub>-Eq / km (substitution)

Cumulative energy demand, nuclear



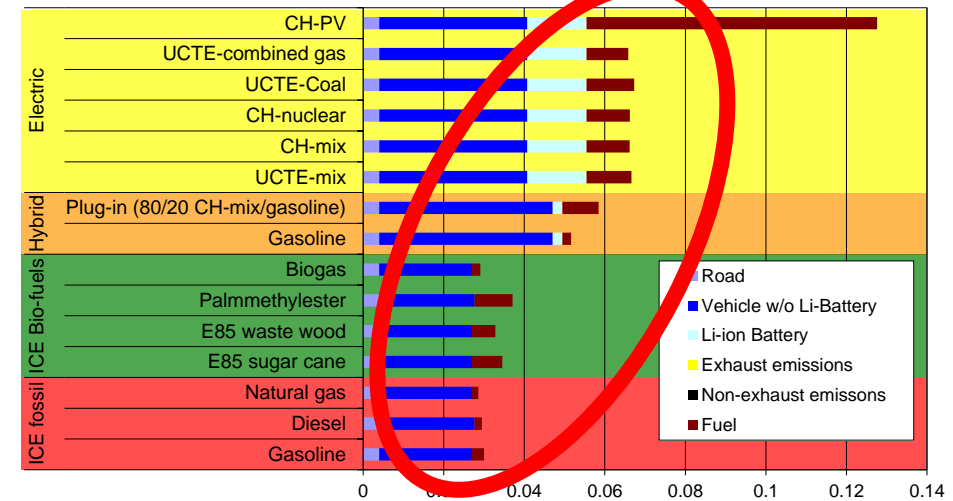
Cumulative energy demand nuclear MJ-Eq / km (substitution)

Cumulative energy demand, fossil



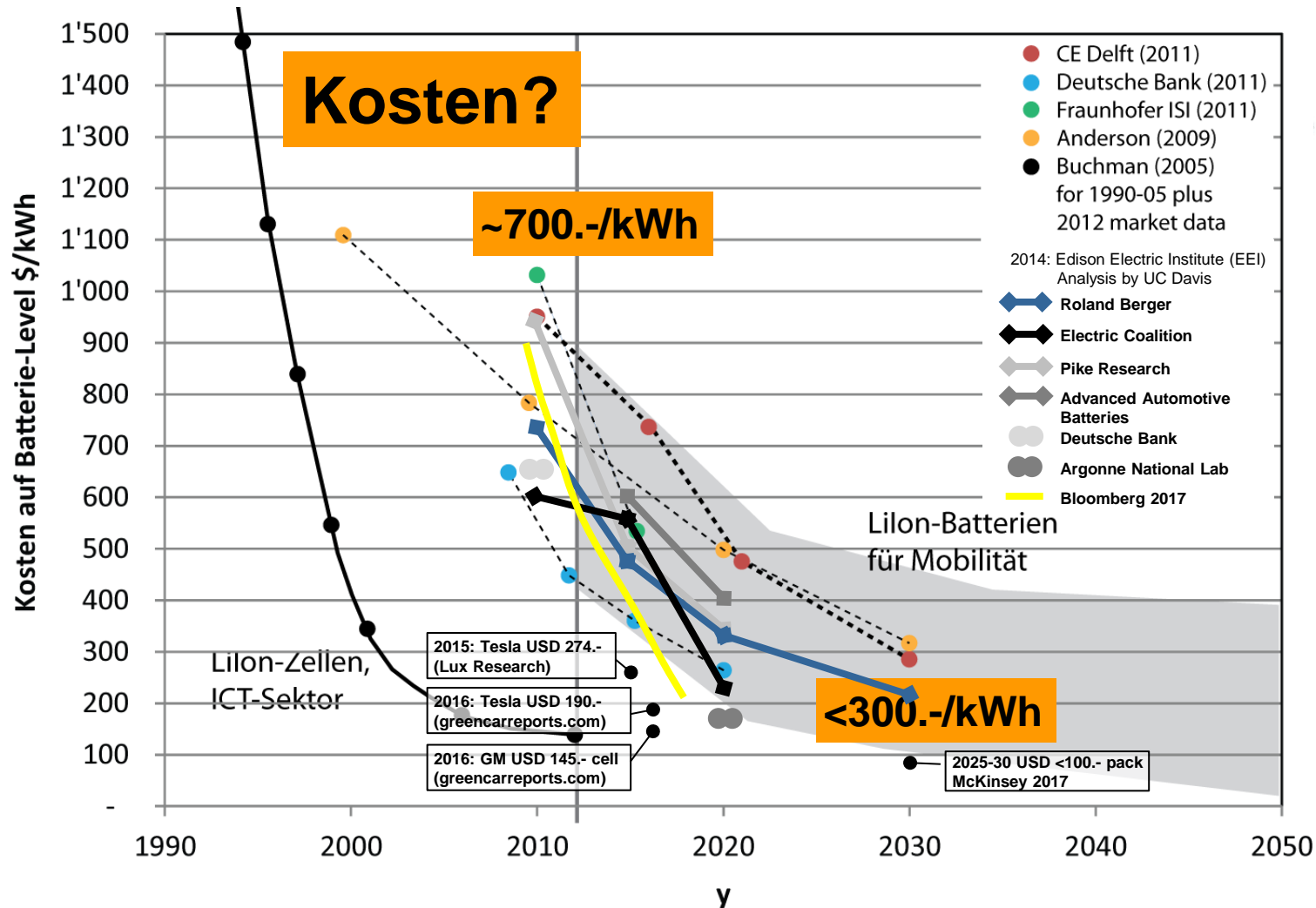
Cumulative energy demand, fossil MJ-Eq / km (substitution)

Cumulative exergy demand, metals

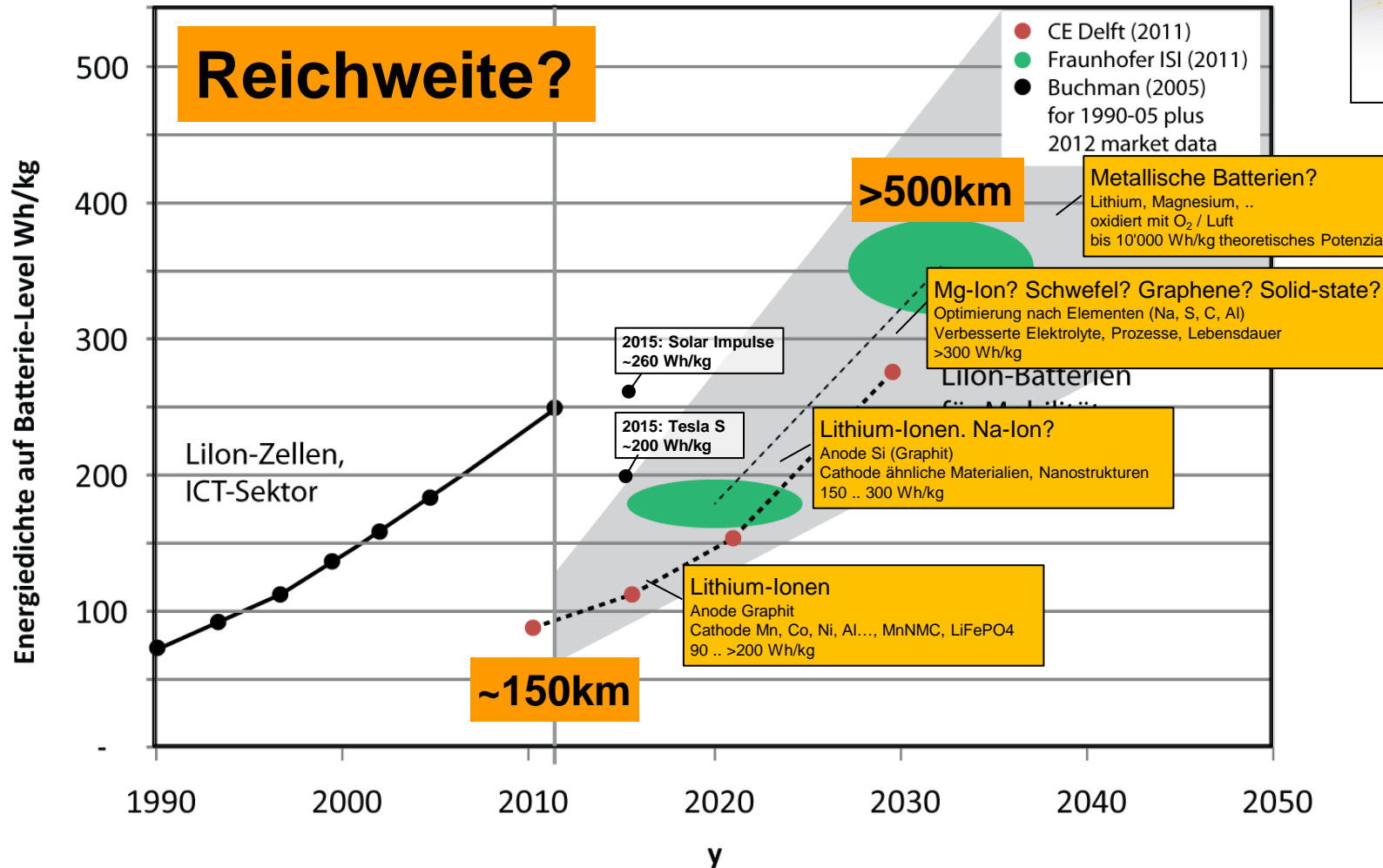


Cumulative exergy demand, metals MJ-Eq / km (substitution)

# Prognostizierte Entwicklung der Batterie-Kosten

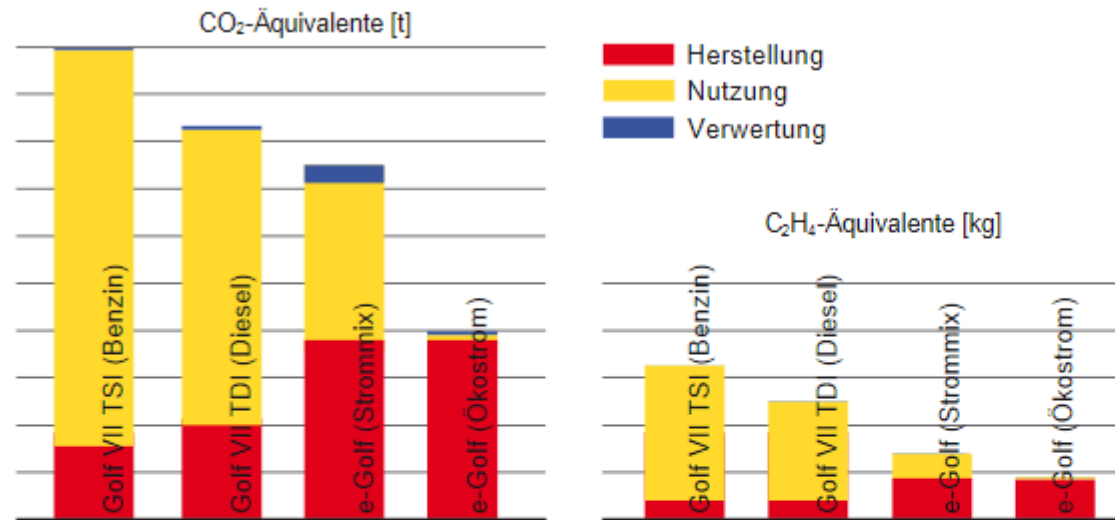


# Die Batterie als Schlüsselfaktor für die Elektromobilität

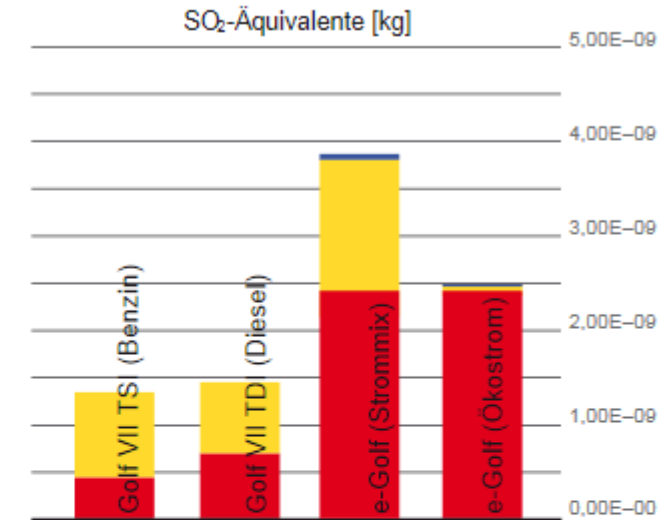


## ■ Der e-Golf, Umweltprädikat - Hintergrundbericht

### Vergleichende Umweltprofile dreier Golf-Varianten VII



Quelle: Der e-Golf, Umweltprädikat - Hintergrundbericht



#### Treibhauspotenzial

Beschreibt die Emissionen von Treibhausgasen, die zu einer Zunahme der Wärmeabsorption der Sonnenstrahlung in der Atmosphäre führen und so zu einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur beitragen können. Referenzsubstanz für das Treibhauspotenzial ist CO<sub>2</sub>, zu dem alle anderen wirksamen Substanzen ins Verhältnis gesetzt werden.

#### Sommersmogbildungspotenzial

Beschreibt die Bildung von Photooxidantien wie Ozon, die sich unter dem Einfluss von Sonnenlicht bilden können. Sie können die menschliche Gesundheit und die Funktion von Ökosystemen beeinträchtigen sowie Pflanzen schädigen. Referenzsubstanz dafür ist Ethen, zu dem alle anderen wirksamen Substanzen wie NO<sub>x</sub> ins Verhältnis gesetzt werden.

#### Versauerungspotenzial

Beschreibt die Emissionen versauernder Stoffe wie beispielsweise SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> mit vielfältigen Auswirkungen auf Böden, Gewässer, Ökosysteme, biologische Organismen und Material. Beispiele dafür sind das Waldsterben oder das Fischsterben. Referenzsubstanz ist SO<sub>2</sub>, zu dem alle anderen wirksamen Substanzen ins Verhältnis gesetzt werden.